



Metsävarojen käytön hiilineutraalius

Otso Hänninen

Maisterintutkielma

Metsätieteiden laitos

Helsingin yliopisto

5.5.2020

Tiedekunta – Fakultet – Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree Programme Metsätieteiden maisteriohjelma	
Tekijä – Författare – Author Otso Hänninen			
Työn nimi – Arbetets titel – Title Metsävarojen käytön hiilineutraalius			
Oppiaine/Opintosuunta – Läroämne/Studieinriktning – Subject/Study track Metsien ja luonnonvarojen ympäristötaloustiede			
Työn laji – Arbetets art – Level Maisterin tutkielma	Aika – Datum – Month and year 5/2020	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages 56 s.	
<p>Tiivistelmä – Referat – Abstract</p> <p>Biopolttoaineiden käyttöä pidetään hiilineutraalina, eli haitattomana toimintana hiilidioksidipäästöjen (CO₂) suhteen. Tämä perustuu oletukseen, että metsänhakkuiden jälkeen kasvaa uusi metsikkö, joka sitoo hakkuista vapautuneen hiilen. Vapautuneen hiilen uudelleen sitominen edellyttäisi kuitenkin, että uusi metsä kasvaisi nopeasti. Aikaväli päästöjen ja uudelleen sitomisen välillä on kuitenkin useita kymmeniä vuosia. Lisäksi puunkäyttö energiantuotannossa pienentää metsän hiilivarastoa.</p> <p>Aiheesta on tehty useita tutkimuksia, joissa käytetään pääosin luonnontieteellisiä malleja, ilman taloustieteellistä näkökulmaa. Työn tavoitteena on tarkastella ja vertailla metsävarojen hiilineutraaliudesta tehtyjä tutkimuksia sekä luonnontieteellisestä- että taloustieteellisestä näkökulmasta. Menetelmänä on kirjallisuuskatsaus ja vertailu eri tiedesuuntien (ekologia, biologia, ekonomia) tavoista tutkia metsävarojen käyttöä ja sen hiilineutraaliutta. Aiheen kirjallisuus sisältää paljon monitieteisyyttä, eli samassa tutkimuksessa on voitu käyttää esim. sekä biologisia tekijöitä kuvaavia malleja, että taloustieteellisiä malleja. Pysin tekemään jaon taloustiedettä sisältävien tutkimusten ja muiden tutkimusten osalta niiden olennaisimpien analyysien ja teoreettisen viitekehyksen mukaan.</p> <p>Tutkimuksissa oli laaja yksimielisyys siitä, ettei metsävarojen käyttöä voida pitää hiilineutraalina. Samoin yksimielistä oli, että metsänkasvu lisää hiilensidontaa ja näin ollen kiertoajan lisäys kasvattaa hiilivarastoa. Luonnontieteellisissä tutkimuksissa keskityttiin mm. hiilidioksidipäästöjen takaisinmaksuaikaan ja ilmaston lämpenemistä kuvaaviin tekijöihin. Taloustieteellisissä tutkimuksissa keskityttiin erilaisiin taloudellisen ohjauksen instrumentteihin, mm. veroon ja tukiaisiin.</p> <p>Taloustieteellisen näkökulman sisällyttäminen tutkimuksiin on välttämätöntä, koska niistä saadaan realistisemmat tulokset ja suuntaviivat politiikkaan. Ilman taloustieteellistä näkökulmaa on vaikeaa ottaa uskottavaa kantaa poliittisiin päätöksiin. Luonnontieteelliset tutkimukset ovat kuitenkin hyödyllisiä, vaikka niihin ei voi yksistään nojata poliittisia päätöksiä tehdessä. Luonnontieteellisissä että taloustieteellisissä tutkimuksissa tietoa voidaan hyödyntää yli tieteenalojen. Onkin tärkeää osata soveltaa analyysin keinoja ja tietoa yli tieteenalojen, tukemaan oman tieteenalan tutkimusta.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords hiilineutraalius, hiilensidonta, hiilidioksidipäästöt, gwp, vero, tukiainen			
Ohjaaja tai ohjaajat – Handledare – Supervisor or supervisors Olli Tahvonen			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited E-thesis			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

Tiedekunta – Fakultet – Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree Programme Master's programme in forest sciences	
Tekijä – Författare – Author Otso Hänninen			
Työn nimi – Arbetets titel – Title Carbon neutrality in the use of forest resources			
Oppiaine/Opintosuunta – Läroämne/Studieinriktning – Subject/Study track Environmental and Resource Economics			
Työn laji – Arbetets art – Level Master's thesis	Aika – Datum – Month and year 5/2020	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages 56 p.	
Tiivistelmä – Referat – Abstract <p>The use of biofuels has been considered as a carbon neutral activity. It is based to the assumption that after harvest grows new forest that sequester the carbon that was released earlier. In that case the new forest should grow very fast. The time frame between release and sequestration is however many decades. Also using forest biomass in energy production decreases forest carbon stock.</p> <p>There are numerous researches done of this subject that are natural science that haven't taken in account the economic side. My aim is to examine and compare the studies with and without the economic point of view. The method is literature survey and comparison of practices in economics and natural science to study carbon neutrality in the use of forest resources. The literature of this subject are multidisciplinary and I have tried to separate economic studies from others according to most relevant analyses and theoretical framework.</p> <p>In the studies there were wide consensus that use of forest resources can't be considered as a carbon neutral activity. Also there were solid consensus that carbon sequestration increases as forests grow, thus longer rotation period increases carbon sequestration. The studies of natural science was focused among other things for payback times and climate warming. In economics the studies focused for example political management instruments like tax and subsidies.</p> <p>It's necessary to include economics to the studies because they give more realistic results and guidelines to politics. Without economic aspect it's hard to make plausible statements to political decisions. The studies of natural science are yet beneficial although they won't alone help for making political decisions. Both economic and natural scientific studies can use information over the branch of science. That's why it is important to adapt analysis and information to support studies in own branch of science.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords carbon neutrality, carbon sequestration, carbon emissions, GWP, tax, subsidy.			
Ohjaaja tai ohjaajat – Handledare – Supervisor or supervisors Olli Tahvonen			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited E-thesis			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

Sisällysluettelo

1. JOHDANTO.....	1
2. AINEISTO JA MENETELMÄ	4
3. LUONNONTIETEELLISET TUTKIMUKSET.....	5
3.1 Tutkimusten ominaispiirteet	5
3.1.1. Yleiset mallit ja metodit	8
3.2 Katsaus tutkimuksiin aihepiireittäin.....	10
3.2.1 Hiilensidonta.....	10
3.2.2 Hiilivelka ja takaisinmaksuaika	12
3.2.3 GWPbio, epäsuorat päästöt ja biopolttoaine vs. fossiilinen polttoaine.....	13
3.4. Yhteenveto tutkimusten tuloksista	19
4. TALOUSTIETEELLISET TUTKIMUKSET.....	20
4.1. Mallit ja ominaispiirteet	20
4.2. Katsaus tutkimuksiin ja niiden tuloksiin	22
4.2 Yhteenveto tutkimusten tuloksista	46
5. TULOKSIEN VERTAILU.....	49
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	50
LÄHTEET	52

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutos on suuri uhka koko maailman ympäristölle ja ihmisille. Fossiilisten polttoaineiden käyttö lisää kasvihuonekaasujen määrää ilmakehässä, mikä lämmittää ilmastoa ja voi näin aiheuttaa monia muutoksia ilmastoon lisäten samalla erilaisia ääri-ilmiöitä. Maanpinnan lämpötila on noussut 140 vuoden aikana jopa n. 1,41 astetta (IPCC 2019).

Maapallon metsät sitovat yhteensä yli 650 miljardia tonnia hiiltä. Näistä 44% on varastoituneena biomassaan ja suurin osa, jopa 45% maaperään. Globaalit hiilivarastot ovat kuitenkin ehtyneet n. 0,5 Gt vuosivauhtia vuosina 2005–2010. Eurooppa, sekä Pohjois- ja Keski-Amerikka ovat ainoat maanosat, joissa hiilivarastot ovat olleet kasvussa kyseisenä ajanjaksona (FAO 2010). Metsä- ja maatalous, sekä muut maankäyttömuodot aiheuttavat kuitenkin jopa 22% kasvihuonepäästöistä (IPCC 2019). Suurimpia päästöjen aiheuttajia ovat fossiilisten polttoaineiden käyttö, sekä metsän muuttaminen viljely- tai laidunmaaksi. (IPCC 2013)

Biopolttoaineiden käyttöä on yleisesti pidetty hiilineutraalina, eli haitattomana toimintana hiilidioksidipäästöjen (CO₂) suhteen. Tämä perustuu oletukseen, että metsänhakuiden jälkeen kasvaa uusi metsikkö, joka sitoo hakkuista vapautuneen hiilen. Vapautuneen hiilen uudelleen sitominen edellyttäisi kuitenkin, että uusi metsä kasvaisi nopeasti muutamassa vuodessa. Esimerkiksi nopeasti kasvavilla viljelykasveilla tämä ajatus voi olla relevantti, mutta ei metsävarojen tapauksessa. Kun plantaasilla kasvaa uusi sato korjattavaksi n. vuoden välein, kestää vastaavasti esim. uuden boreaalisen metsän kasvu n. 70–120 vuotta, kunnes se on hakkuukypsä (Storaunet and Rolstad 2002). Hiilidioksidipäästöillä kestää siis useita vuosia, että ne tulevat uudestaan sidotuiksi hitaasti kasvaviin metsiin. (Holtmark 2012)

Bioenergian tuotannossa vapautuvan hiilen laskentatavat voivat vääristää aiheutuneiden päästöjen oletettua määrää ja vaikuttaa näin poliittisiin päätöksiin. Mikään valtio ei aseta veroja bioenergian käytöstä aiheutuvista hiilidioksidipäästöistä, eikä niitä ole sisällytetty EU:n päästökauppajärjestelmän piiriin tämän hiilineutraalioletuksen takia (Holtmark 2012). Useat taloustieteelliset tutkimukset (mm. Tahvonen 1995, Lintunen ja Uusivuori 2013) kuitenkin ehdottavat, että mistä tahansa puuperäisestä

hiilidioksidipäästöstä pitäisi asettaa vero. Biopolttoaineita kuitenkin verotetaan, tosin matalammalla asteella kuin fossiilisia polttoaineita (Verohallinto 2018). Veron lisäksi valtio voi tukea metsänhoitoa. Suomessa esim. Kemera-tukea voidaan myöntää yksityiselle metsänhoitajalle silloin, kun metsänhoito olisi muuten yksityistaloudellisesti kannattamatonta (Metsäkeskus 2016). Optimaalisessa ilmastopolitiikassa metsänomistajille maksettaisiin myös tukiasia hiilensidonnasta (Tahvonen 1995, Lintunen ja Uusivuori 2013).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ohjeistaa, että CO₂ päästöt tulee laskea vain yhdestä lähteestä kerrallaan, jotta vältetään päästöjen aliarvioinnilta tai kaksinkertaiselta laskennalta (IPCC 2006). Tällöin esim. vain hakkuista tulleet päästöt lasketaan ja siitä saatavan biomassan tuotannon päästöjä pidetään päästöttöminä (Lintunen ja Uusivuori 2013). Searchingerin ym. (2009) mukaan Kioton pöytäkirjan (Kyoto Protocol) mukaisessa päästökatoissa bioenergian käyttö on niin ikään virheellisesti oletettu hiilineutraaliksi. Laskelmat eivät ota huomioon bioenergian tuotantovaiheista ja käytöstä syntyviä päästöjä, vaikka esim. puun ja bioenergiaksi kasvatettujen kasvien poltto niitä aiheuttaa. Fargionen (2008) tutkimuksen mukaan sademetsien tai soiden muuttaminen viljelymaaksi biopolttoaineiden tuotantoa varten voi kuitenkin aiheuttaa vuosittaisten hiilidioksidipäästöjen kasvun jopa 17–420 kertaisiksi.

Ilmaston lämpeneminen ja lisääntyvä energiankäyttö on johtanut tarpeeseen tuottaa ympäristöystävällisempiä energiavaihtoehtoja biopolttoaineista, ja sen kannattavuutta fossiilisiin polttoaineisiin nähden on arvioitu useissa tutkimuksissa. Holtsmarkin (2015b) mukaan hitaasti kasvavista metsistä tuotetulla bioenergialla on suuremmat lämmitysvaikutukset ilmastoon, kuin fossiilisilla polttoaineilla 100 vuoden aikajaksolla. Zanchin ym. (2012) mukaan bioenergian hyödyt fossiilisiin polttoaineisiin nähden riippuvat bioenergian lähteestä ja tarkastellusta ajanjaksosta. Biopolttoaineen hyötyihin vaikuttaa myös, kuinka ne ovat tuotettu. Kasvavalla biopolttoaineiden käytöllä voi olla myös välillisiä ilmastovaikutuksia, kun maata muokataan bioenergian tuotantoon sopivaksi. Lisääntyvä biopolttoainetuotanto voi laskea energian hintoja ja näin kasvattaa energian kulutusta (Fargione ym. 2008). Verrattaessa bioenergian käyttöä fossiilisten polttoaineiden käyttöön, takaisinmaksuaikaan vaikuttaa esim., mitä fossiilista polttoainetta käytetään (Holtsmark 2012).

Aiheesta tehdyissä tutkimuksissa ollaan laajalti yhtä mieltä siitä, ettei metsävarojen käyttöä voida pitää hiilineutraalina. Useat tutkimukset jättävät kuitenkin paljon kysymyksiä esim. niiden käyttämien mallien ja metodien vuoksi. Suuressa osassa tutkimuksia aihetta on käsitelty ilman taloustieteellistä näkökulmaa. Siksi olemassa olevaan kirjallisuuteen tulee suhtautua kriittisesti ja pohtia, kuinka taloustieteelliset tutkimukset ja niiden tulokset eroavat muista luonnontieteellisistä tutkimuksista, joissa ei oteta taloustieteellistä näkökulmaa huomioon. Tässä työssäni otan kriittisesti kantaa aihetta käsittelevään kirjallisuuteen ja tuon mukaan taloustieteellisen näkökulman.

Työn tavoitteena on tarkastella ja vertailla metsävarojen hiilineutraaliudesta tehtyjä tutkimuksia sekä luonnontieteellisestä- että taloustieteellisestä näkökulmasta. Luonnontieteelliset tutkimukset olen jaotellut pääosin tutkittavan aiheen mukaan. Kappaleeseen 3.2.3 on käsiteltävän aiheen laajuuden vuoksi sisällytetty useampi aihealue. Aluksi tarkastelen aiheesta tehtyjä tutkimuksia, niiden ominaispiirteitä ja tuloksia. Tämän jälkeen tarkastelen aiheen kirjallisuutta taloustieteellisestä näkökulmasta, tutkimusten malleja ja niiden tuloksia. Lopuksi vertailen näiden kahden lähtökohdan eroja ja mahdollisia hyötyjä ja haittoja.

2. AINEISTO JA MENETELMÄ

Tutkimuksessa käyttämäni aineisto koostuu aiheesta tehdyistä tutkimuksista. Tarkastelemani tutkimukset on valikoitunut hakemalla tutkimuksia aiheen kirjallisuudessa usein toistuvien termien mukaan, sekä tutkimuksissa olleista lähdemateriaaleista. Suurin osa tutkimuksista käsittelee boreaalisen vyöhykkeen metsiä, pl. (Daigneault ym. 2012). Holtsmarkin (2015) väitöskirja ”Seven essays on policies and international cooperation to abate emissions of greenhouse gases” antaa hyvän pohjan aiheen kriittiseen tarkasteluun. Holtsmarkin (2012, 2015a, 2015b) tutkimuksissa on käytetty sekä taloustieteellisiä että biologisia tai ekologisia tekijöitä kuvaavia malleja. Menetelmänä on kirjallisuuskatsaus ja vertailu eri tiedesuuntien (mm. ekologia, biologia, ekonomia) tavoista tutkia metsävarojen käyttöä ja sen hiilineutraaliutta.

3. LUONNONTIETEELLISET TUTKIMUKSET

3.1 Tutkimusten ominaispiirteet

Luonnontieteellisissä tutkimuksissa on tyypillistä, ettei niissä optimoida parasta ratkaisua, vaan käytetään tieteenalasta riippuen mm. biologisia tai ekologisia tekijöitä kuvaavia malleja. Vaikka tutkimusten oletukset, alueelliset erot ja johtopäätökset vaihtelevat, vaikuttaa saatuihin tuloksiin usein pitkälti samat parametrit; takaisinmaksuaika (payback) ja pariteetti (parity)-skenaario. Vapautuneen hiilidioksidin määrää kutsutaan hiilivelaksi (carbon debt). Hiilivelka on ”maksettu takaisin” kun uudelleen kasvava biomassa on sitonut hiiltä saman määrän, kuin sitä vapautui (Fargione ym. 2008). Kertynyt hiilivelka on yleensä määritetty kulutetun biomassan määrän ja tyypin mukaan. Myös mahdolliset hakkuista aiheutuvat muut päästöt mm. maankäyttömuodon vaihtaminen vaikuttaa aiheutuneeseen hiilivelkaan. Takaisinmaksuaikoihin vaikuttavat esim. uuden biomassan kasvuvauhti, joka edelleen riippuu mm. kasvupaikasta, puulajista ja metsänhoitotoimenpiteistä. (Lamers ja Junginger 2013)

Pariteetti-skenaariossa voidaan arvioida erilaisten metsänhoitotoimien tai tuotantovalintojen vaikutusta hiilitaseeseen, vertaamalla referenssiskenaarion tuloksia pariteettiskenaarion tuloksiin. Pariteetti-ajat (parity times) kuvaavat aikaa, joka pariteettiskenaarion kestääkseen saavuttamaan referenssiskenaarion vastaava hiilitase. Siihen vaikuttaa usein referenssiskenaarion valinta ja rakenne, sekä bioenergian käytön hyötyjä tutkittaessa fossiilisen polttoaineen käytön korvaavuuden tehokkuus. Nykyiset analyysit vaihtelevat oletusten, kansallisten eroavaisuuksien, ja johtopäätösten valossa. Tutkimuksissa käytettävät metodit vaikuttavat tutkimusten mahdollisuuksiin tuottaa relevantteja tuloksia ja asettavat rajoitteet tutkittavalle kohteelle. Tutkimusaineistona käytetään usein joko empiiristä tai teoreettisesti kuvaavaa dataa. (Lamers ja Junginger 2013)

Life Cycle Assessment (LCA) on menetelmä tuotteen tai palveluiden ympäristövaikutusten arviointiin koko sen elinkaaren aikana (Rebitzer ym. 2004, Finnveden ym. 2009). Arviointi pyrkii kattamaan kaiken raaka-aineen käytöstä tuotteen kulutukseen ja ottamaan huomioon kaikki valmistettavan tuotteen elinkaaren aikana mahdolliset ympäristö- ja terveyshaitat. Menetelmää voidaan käyttää monilla eri sektoreilla

metsäsektorin lisäksi. Sitä käytetään tietokoneohjelmiston avulla, jota voidaan räätälöidä eri toimialoille sopivaksi (Rebitzer ym. 2004). Ohjelmassa on oltava käytettävissä kuitenkin riittävästi dataa, jotta se antamat tulokset olisivat riittävän hyviä. (Finnveden ym. 2009) Monissa tutkimuksissa LCA-menetelmää käytetään yhdessä muiden mallien kanssa.

Schlamadinger ja Marland (1996) määrittivät siirtymäkertoimen (displacement factor) kaavan, jolla voidaan määrittää vältetty fossiilisen polttoaineen hiilidioksidipäästön määrä, kun se korvataan biopolttoaineella (1). Vastaavasti voidaan määrittää puutuotteiden käytön hyöty rakennusmateriaalina verrattuna esim. teräkseen tai betoniin. Molemmissa siirtymäkertoimissa (D_f) mittayksikkönä on MgC (MgC)^{-1} . Kyseistä siirtymäkerrointa on käytetty mm. Pingoud (2012), Marland ja Schlamadinger (1997) tutkimuksissa.

$$D_f = \frac{\text{bioenergiajärjestelmän tehokkuus}}{\text{korvatusen fossiilisen energiankäytön tehokkuus}} \quad (1)$$

$$x = \frac{\text{fossiilisen polttoaineen C-päästöt per J}}{\text{biopolttoaineen C-päästöt per J}}, \text{ missä}$$

J: Joule

Useissa tutkimuksissa hiilidioksidipäästöjen sijaan puhutaan ilmaston globaalista lämmityspotentialista (global warming potential). Globaali lämmityspotentialiaali (GWP) on yleisesti käytetty mittari kasvihuonekaasujen (GHG) ilmastovaikutusten mittaamiselle. IPCC otti tämän mittarin käyttöön vuonna 1990 ja mm. Kioton pöytäkirjassa on hyväksytty tämän laskutavan käyttö eri päästöjen vertailuun ja laskemiseen niille vastike CO_2 :na (Joos ym. 2013). GWP määrittää kumulatiivisen lämmityspotentialiaalin kasvihuonekaasupäästöstä tietyn aikajakson aikana, ottaen huomioon sen lämpösäteilyn imeytymisen ilmakehään ja elinkaaren ilmakehässä Sen suhdeluku CO_2 :sta on 1. Näin ollen suhdeluvun ollessa > 1 , ilmakehän lämmityspotentialiaali on suurempi, kuin hiilidioksidipitoisuus ilmakehässä. (Holtmark 2015a).

GWP kuvaa aikaan sidotun päästösykäyksestä aiheutuneen säteilypakotteen¹ (radiative forcing) massan yksikkönä nimellisessä ajassa $t = 0$ (2), TH kuvaa tarkasteltavaa aikahorisonttia.

$$GWP_x(TH) = \frac{AGWP_x(TH)}{AGWP_{CO_2}(TH)} \quad (2)$$

Absolute global warming potential (AGWP):

$$AGWP_x(TH) = \int_0^{TH} RF_x(t) dt = \int_0^{TH} A_x \cdot IRF_x(t) dt, \text{ missä} \quad (3)$$

$RF_x(t)$: päästösykäyksen hetkellä $t = 0$ aiheuttama säteilypakote ajassa t

A_x : säteilypakote kasvihuonekaasun x päästöä per 1 kg:n lisäys ilmakehässä

Ilmakehän CO_2 -kuorman aiheuttama poikkeama ΔN_{CO_2} suhteessa referenssikuormaan $N_{CO_2,0}$:

$$RF_{CO_2}(\Delta N_{CO_2}) = 5.35 \text{ Wm}^{-2} \ln \left(\frac{N_{CO_2,0} + \Delta N_{CO_2}}{N_{CO_2,0}} \right) \quad (4)$$

$IRF_x(t)$ kuvaa päästösykäyksen aiheuttaman päästön pitoisuutta ilmakehässä ajassa t :

$$IRF_x(t) = a_{x,0} + \sum_{i=1}^n a_{x,i} \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_{x,i}}\right), t \geq 0. \quad (5)$$

Metsävarojen hiilineutraalisuutta käsittelevissä tutkimuksissa on tyypillistä niiden monitieteisyys. Samassa tutkimuksessa voidaan hyödyntää esim. biologisia, ekologisia, sekä taloustieteellisiä malleja. Osa tarkastelemiani tutkimuksia sisältää poikkitieteellisyttä, yhdistäen erillisiä osa-analyyssejä eri tieteenaloilta. Siksi jako taloustieteellisiin ja taloustiedettä sisältämättömiin tutkimuksiin ei aina ole itsestään selvä. Tässä työssä olen pyrkinyt tekemään tämän jaon tutkimuksen olennaisimpien analyysien ja teoreettisen viitekehyksen mukaan.

¹ ”Ilmaston imeytyvän auringonsäteilyn ja maasta avaruuteen poistuvan pitkäaaltoisen säteilyn erotusta kutsutaan maan säteilytaseeksi. Tämän taseen muutos on ilmastomuutoksen säteilypakote.” Tieteen termipankki [9.3.2020]

3.1.1. Yleiset mallit ja metodit

Suuressa osassa tutkimuksia metodina on käytetty joko kiinteän maiseman (fixed landscape) tai metsikkötason (stand-level) metodia. Yksinkertaistetusti metsikkötason metodissa tarkastellaan yksittäistä palstaa tai lohkoa, jolle tehdään skenaarion mukainen toimenpide, kuten päätehakkuu. Tulevat hakkuut tehdään samalle palstalle tutkimukseen valitun kiertoajan jälkeen. Tämän metodin hyötynä on sen yksinkertaisuus, mikä tarjoaa usein helposti hyväksyttäviä tuloksia. (Lamers ja Junginger 2013)

Kiinteän maiseman metodissa voidaan tarkastella useita metsäpalstoja eri hakkuu- ja harvennusskenaarioilla ja niiden vaikutuksia hiilensidontaan, jolloin ajan ja tilan dynamiikka saadaan mukaan tarkasteluun. Yksinkertaistetusti se voi sisältää määritetyn määrän lohkoja, jotka hakataan määritellyllä kiertoajalla lohko kerrallaan. Tällöin koko alueen hiilitase on kaikkien lohkojen summa. Suuressa osassa metsän hiilivaroja simuloivissa tutkimuksissa käytetään tätä metodia. (Lamers ja Junginger 2013)

Luonnontieteellisissä tutkimuksissa käytetään usein samankaltaisia biologisia- tai ekologisia tekijöitä kuvaavia malleja, joita on muokattu kyseiseen tutkimukseen sopivaksi. Lisäksi usein käytetään jotain tietokoneohjelmistoa, minkä valmiiseen malliin voi syöttää datan ja määrittää haluamansa rajoitteet ja reunaehdot (Taulukko 1).

Tutkimus	Mallit/Ohjelmistot
1. Cherubini ym. (2011a)	Bern CC 2.5, IRF
2. Cherubini ym. (2011b)	Bern CC, IRF
3. Bernier ja Paré (2013)	TRANSREG
4. Pingoud ym. (2012)	Bern CC 2.5, REFUGE 3
5. Repo ym. (2011)	Yasso07
6. Seely ym. (2002)	FORECAST
7. Zanchi ym. (2012)	GORCAM
8. Lamers ym. (2014)	CBM-CFS3
9. Repo ym. (2012)	Yasso07
10. Guest ym. (2013)	Yasso07, IRF
11. Marland ym. (1997)	GORCAM
12. Repo ym. (2015)	CO2FIX, Yasso 07

Taulukko 1. Tutkimusten mallit

Bern CC on fysiikka-biokemiapohjainen malli, joka sisältää dynaamisen maailmanlaajuisen kasvillisuusmallin, sekä ilmakehän ja meren välisen yleisen kiertomallin. Se laskee tulevat hiilidioksidi- ja muut kasvihuonepäästöt, sekä niiden ja aerosolien aiheuttaman säteilyvoiman. Malliin on sisällytetty parametrejä, kuten maanpinnan lämpötila, sademäärä, pilvisuus, sekä meren lämpölaajeneminen. Lisäksi ilmakehän hiilidioksidipitoisuus lasketaan fossiilisten polttoaineiden käytön, maankäytön muutosten, ja meren sekä maan biosfäärin hiilen vapautumisesta. Mm. Holtsmarkin (2015a, 2015b) ja Pingoudin (2012) tutkimuksissa käytettävät Bern 2.5CC- mallit pohjautuvat tähän malliin. (Joos ym. 2001).

Tuomi ym. (2009) kehittivät Yasso07-mallin estimoimaan kasvikaarikkeen maatumista ja ilmaston vaikutuksia maatumiseen, käyttäen alkuperäistä karikkeen kemianrakennetta, ilman lämpötilaa sekä sademäärää. Muissa tutkimuksissa (Repo ym. 2011, Repo ym. 2012) tätä mallia on käytetty pohjana.

FORECAST on Kimminsin (1999) kehittämä ohjelmistopohjainen malli, jota käytetään metsän ekosysteemin tuottavuuden laskentaan, joka perustuu ekologisiin metsänkasvumalleihin.

Schlamadinger ja Marland (1996) kehittivät GORCAM-mallin, jolla lasketaan hiilensidontaa puissa, pitkä- ja lyhytikäisissä puutuotteissa, fossiilisissa polttoaineissa, kun niitä ei kuluteta, sekä kun fossiiliset polttoaineet korvataan biopolttoaineilla.

CBM-CFS3 (Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector)- ohjelmistomalli laskee metsän hiilivaraston, ottaen huomioon metsän ekologiset ja ihmisten aiheuttamat hiilivaraston vaihtelut. (Lamers ym. 2014)

TRANSREG on ohjelmisto, jonka avulla voidaan tuottaa erilaisia tutkimuksia ja analyysejä syöttämällä data ja reunaehdot ohjelmistoon. [Sas-ohjelmisto 5.9.2019]

CO2FIX on ohjelmistopohjainen malli, mikä simuloi vuotuisen hiilivaraston ja sen muutoksen hehtaarin alueella. Malliin syötetään oletettu puun kasvuvauhti, josta saadaan laskettua biomassan kasvu. Malliin syötetyt oksien, lehtien ym. kasvukertoimet määritetään puunrungon kasvuvauhdin mukaan. (Repo ym. 2015)

3.2 Katsaus tutkimuksiin aihepiireittäin

3.2.1 Hiilensidonta

Seely ym. (2002) laskivat hiilensidonnan boreaalisissa metsissä käyttäen ekosysteemin simulaatiomallia FORECAST. Mallissa käytetty data oli johdettu aiheesta käsittelevän kirjallisuuden lähteistä. Hiilensidonta laskettiin erikseen kolmesta eri puulajista, sekä maaperästä. Jokaiseen laskentaan sisällytettiin kilpaileva ruoholajike ja kiertoajaksi asetettiin 300 vuotta. Tuloksia verrattiin metsäpaloskenaarioon, joka tapahtui 150 vuoden välein. Tulosten mukaan maaperän hiilivarasto pysyi melko vakaana sitoen hiiltä hieman yli 100 Mg ha^{-1} . Puun ja lehtikarikkeen hiilensidonta vaihteli eri harvennusskenaarioiden mukaan. Suurin hiilensidonta lehtikarikkeella oli heti hakkuiden jälkeen, jolloin maatumisen ei ole vielä kunnolla alkanut. Joka puulajilla hiilensidonta oli maksimissaan juuri ennen hakkuita, mutta maksimaalinen hiilivarasto laski myöhemmissä hakkuissa kiertoajan pidentyessä. Keskimääräinen hiilivarasto kasvoi joka puulajilla, karikkeella ja maaperässä kiertoajan kasvaessa. (Seely ym. 2002)

Marland ja Schlamadinger (1997) vertasivat kahta skenaariota CO₂ päästöjen vähentämiseksi käyttäen GORCAM-mallia. Malliin sisällytetyt parametrit olivat kaadetun biomassan jakautuminen jätteisiin ja puutuotteisiin, puutuotteiden, maaperän ja karikkeen keskimääräinen elinikä, puutuotteiden ja niiden korvaavuuden tehokkuus, sekä puuntuotantoon ja sen korvaamiseen vaadittava energiamäärä. Ensimmäisessä skenaariossa metsää ei hakattu, jolloin se sai sitoa hiiltä mahdollisimman paljon. Toisessa skenaariossa metsää hakattiin lyhyellä kiertoajalla ja käytettiin fossiilisen polttoaineen korvikkeena. Tuloksien mukaan säännölliset harvennukset voivat johtaa huomattavasti pienempään hiilensidontaan, kuin vapaasti kasvavalla metsällä. Hiilidioksidipäästöjen nettovaikutukseen voi kuitenkin vaikuttaa metsän kasvuvauhti ja biotuotteiden käytön tehokkuus. Metsävarojen käyttö tulee kannattavammaksi, kun fossiilisten polttoaineiden käyttöä korvataan hyödyntäen metsävaroja tehokkaasti ja kestävästi. (Marland ja Schlamadinger 1997)

Repo ym. (2015) tarkastelivat biomassan hiilivaraston kehitystä oletetussa Etelä-Suomen kuusimetsässä 90 vuoden kiertoajalla käyttäen CO2FIX mallia. Tutkimuksessa käytettiin estimoituja arvoja kuusen vuosittaisesta kasvusta. Harvennukset tehtiin 40, 60 ja 80 vuoden kohdalla. Harvennuksissa 15% ja päätehakkuissa 10% runkopuusta oletettiin muuttuvan karikkeeksi, mikä hajotessaan laskettiin maaperän hiilivarastoksi. Maaperän hiilivaraston muutokset simuloitiin Yasso 07-ohjelman avulla. Tutkimuksessa käytiin läpi viisi skenaariota: päätehakkuiden jälkeen hakkuutähteiden keräämättä jättäminen ja kerääminen, puun kasvuvauhdin muutos, maatumisasteen muutos, sekä kiertoajan pidennys.

Kun hakkuutähteet jätettiin metsään maatumaan, keskimääräinen kokonaishiilivarasto kiertoajan aikana oli 159t C ha⁻¹. Sama tulos saatiin skenaariossa, missä hakkuutähteet käytettiin bioenergiaksi ja puustonkasvua lisättiin 10%, sekä kun maatumisastetta laskettiin 21%. Kun hakkuutähteet kerättiin bioenergian käyttöön, metsän kokonaishiilivarasto laski 150t C ha⁻¹:n, mikä osoitti hakkuutähteiden käytön vähentävän sidotun hiilen määrää. Kun puuston kasvua lisättiin 38% kompensoimaan hakkuutähteiden käyttöä, hiilensidonta kasvoi saaden arvon 183t C ha⁻¹. Kiertoajan pidentäminen lisäsi metsän kokonaishiilivarastoa, saaden 120 vuoden kiertoajalla arvon 172t C ha⁻¹. (Repo ym. 2015)

3.2.2 Hiilivelka ja takaisinmaksuaika

Bernier ja Paré (2013) tutkivat metsävarojen käytön potentiaalia kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi. Ensimmäisessä skenaariossa puuta käytettiin raaka-aineena pellettien tuotantoon ja referenssiskenaariossa raaka-aineena käytettiin fossiilisia polttoaineita. Tutkimuksessa laadittiin aikasarjat Kanadan hiiliohjelman tutkimusverkoston mittaamille NEE (net ecosystem exchange) -arvoille TRANSREG-ohjelmiston avulla. NEE kuvaa maassa olevaa hiilitasetta, eli kuinka paljon maahan on sidottu hiiltä, verrattuna kuinka paljon sitä on poistunut. NEE on negatiivinen, kun hiiltä on sidottu enemmän kuin poistunut ja positiivinen, kun sitä on poistunut enemmän kuin sitoutunut.

Sekä fossiilisen polttoaineen että puuraaka-aineen skenaariossa päästöt olivat tasaiset koko ajanjakson. Fossiilisen polttoaineen skenaariossa hiilensidonnan havaittiin olevan pientä mutta jatkuvaa, kompensoiden vuosittain öljyn tuotantoa. Puuraaka-ainetta käytettäessä NEE-arvot olivat aluksi positiiviset, mutta metsän kasvaessa ne muuttuivat kasvavalla vauhdilla negatiiviseksi, kun uuden metsän kasvaessa hiilensidonta lisääntyi. Hiilivelan takaisinmaksu ajaksi laskettiin 90 vuotta, jolloin molempien skenaarioiden päästöjen kumulatiivinen erotus oli 0. Takaisinmaksuajan havaittiin riippuvan kiertoajasta. Kyseisessä boreaalisen metsän skenaariossa metsä hakattiin 120 vuotiaana, mutta kiertoaikaa lyhentämällä takaisinmaksuaikakin pitenisi. Toisaalta nopeammin kasvava metsä lyhentäisi takaisinmaksuaikaa. (Bernier ja Paré 2013)

Lamers ym. (2014) tutkivat hyönteistuhoilta altistuneen metsän hyödyntämispotentiaalia pellettien tuotantoon. Aikaan sidottu hiilivarasto laskettiin CBM-CFS- mallin avulla useiden skenaarioiden mukaan esim. eri hyönteistuhon asteilla, ottaen huomioon ekosysteemin ja puutuotteiden hiilensidonnan, sekä fossiilisen polttoaineen korvaamisen. Metsässä olevan hiilen kriittinen- ja pariteettipiste laskettiin omilla kaavoillaan. Kriittinen piste määritettiin ajaksi, jolloin hakatun metsäalueen ja siitä saatujen puu- ja bioenergiatuotteiden sitoman hiilen määrä pysyy alempana, kuin ennen hakuita, ottaen huomioon metsään- ja lopputuotteisiin sitoutuneen hiilen, sekä korvatut fossiiliset polttoaineet ja toimitusketjun päästöt. Pariteettipiste määritettiin ajaksi, jolloin hakatun metsäalueen ja siitä saatujen puu- ja bioenergiatuotteiden sitoman hiilen määrä skenaariossa pysyy alempana, kuin referenssiskenaariossa.

Hiilen takaisinmaksuaikaa määritettiin metsän kaskeamis-skenaariolla, jossa vain sahanpurua käytetään pellettien tuotantoon. Männyllä takaisinmaksuajaksi saatiin 20-25 vuotta ja kuusella 37-39 vuotta. Käytettäessä hakkuutähteitä pellettituotantoon ja korvaamaan kivihiiltä, takaisinmaksuajat lyhenivät 9-20 vuotta ja nettohiilihyödyksi saatiin 17-21 tonnia C ha⁻¹. (Lamers ym. 2014)

3.2.3 GWP_{bio}, epäsuorat päästöt ja biopolttoaine vs. fossiilinen polttoaine

Cherubini ym. (2011a) tutkivat biomassan käytön aiheuttamien CO₂-päästöjen vaikutusta ilmastoon. Koska merestä poistuu myös huomattava määrä hiilidioksidia, meren hiilidioksidipäästöt määritettiin biomassan aiheuttamien päästöjen lisäksi. IRF:n (impulse response function) tuloksia verrattiin Bern CC2.5-mallin tuloksiin.

GWP_{bio} on bioenergiankäytölle varsinaisen GWP:n pohjalta kehitetty yksikköpohjainen indeksi, mikä toimii indikaattorina biomassan polton aiheuttamalle lämmityspotentialille hiilidioksidipäästöistä biomassan kiertoajan funktiona. Se ottaa huomioon, kuinka kasvavat puut sitovat vapautuneen hiilidioksidin takaisin, sekä hiilidioksidin hajoamisajan ilmakehässä. Sen määrittämisen pohjana on käytetty impulse response function:ia (5), joka on johdettu hiilenkiertomalleista muokatulla hiilidioksidin hajoamisesta ilmakehässä (atmospheric decay) kuvaavilla funktioilla. (Cherubini ym. 2011a)

Tutkimuksessa:

IRF:

$$y_{\text{CO}_2}(t) = A_0 + \sum_{i=1}^{i=n} A_i e^{(-t/\tau_i)}.$$

$AGWP = C_0 \int_0^{\infty} \alpha y(t) dt$, missä α on säteilyn voimakkuus ja $y(t)$ hajoamisfunktio (decay function), mikä kuvaa kasvihuonekaasun säilymisaikaa ilmakehässä yhden hiilidioksidisyksikön (C_0) lisäyksen jälkeen.

GWP määritettiin mille tahansa kasvihuonekaasulle (i) yhtälöstä:

$$GWP_i = \frac{AGWP_i}{AGWP_{\text{CO}_2}} = (C_0 \int_0^{TH} \alpha_i y_i(t) dt) / (C_0 \int_0^{TH} \alpha_{\text{CO}_2} y_{\text{CO}_2}(t) dt),$$

jolloin se toimii mittarina yhdistäen useiden kasvihuonekaasujen päästöt yhteiseksi yksiköksi (kg CO₂-eq).

GWP_{bio} kuvaa biomassan polttamisesta aiheutuvien CO_2 -päästöjen suhteellista vaikutusta ilmastoon:

$$GWP_{bio} = \frac{AGWP_{bioCO2}}{AGWP_{CO2}} = (C_0 \int_0^{TH} \alpha_{CO2} f(t) dt) / (C_0 \int_0^{TH} \alpha_{CO2} y(t) dt)$$

Tutkimuksessa havaittiin biopolttoaineiden aiheuttaman hiilidioksidi-impulssin vaikuttavan vähemmän aikaa ilmastossa, kuin fossiilisten polttoaineiden. GWP_{bio} -indeksi oli kuitenkin suurempi lyhyellä 20 vuoden aikavälillä, mutta pienempi pidemmillä aikaväleillä (100 ja 500 vuotta). Tutkimuksen mukaan biopolttoaineiden poltto tulee aina kannattavammaksi, kun kiertoaikaa lisätään. (Cherubini ym. 2011a)

Cherubinin ym. (2011b) mukaan varsinaisen ilmastovaikutuksen arvion pitäisi ottaa huomioon hiilidioksidin määrän vaihteluiden jakautuminen ajan kuluessa. Kun bioenergian käytön hiilidioksidipäästö tapahtuu tietyssä ajankohtana, jakautuu hiilensidonta useille vuosikymmenille. Tämä on otettu huomioon kyseisessä tutkimuksessa sisällyttämällä dynaaminen aikasuhte yksikköpohjaiseen analyysiin boreaalisen metsän tapauksessa. Boreaalisen metsän kasvu on mallinnettu Schnuten (1981) mallilla, mikä on alun perin kehitetty kaloihin liittyvään tutkimukseen:

$$G(t) = (\alpha + \beta e^{\gamma t})^\delta$$

Bern CC- mallissa käytetty IRF määrittä CO₂-päästöjen hajoamista ilmakehässä, kuten yhtälössä (1):

$$y(t) = A_0 + \sum_{i=1}^3 A_i e^{-t/\tau_i}$$

Tutkimuksen mukaan 20 vuoden ajanjaksolla biomassan poltosta aiheutuu lähes samat päästöt, kuin fossiilisista polttoaineista. Pidentämällä tarkasteltavaa ajanjaksoa biomassan käytöstä tulee kuitenkin kannattavampaa, mikä on sama tulos kuin Cherubinin ym. (2011a) tutkimuksessa. (Cherubini 2011b)

Pingoud ym. (2012) arvioi metsän biomassan koko elinkaaren aiheuttamaa lämmitysvaikutusta suhteessa fossiilisiin polttoaineisiin ja uusiutumattomiin materiaaleihin. AGWP hiilivelasta ja biomassan käytön hyödyistä koko elinkaaren aikana estimoitii ilmastomuutoksen hillitsemisen ajan funktiona (function of the time frame of climate change mitigation). Määrittääkseen hiilidioksidipäästöjen vaikutusajan ilmakehässä,

sovellettiin BERN CC 2.5 mallia. REFUGE3- mallilla laskettiin ilmakehän metaanihiilidioksidi- ja typpipitoisuus.

Biomassa laskettiin kolmelta oksien- ja neljältä kannon mitalta, minkä lisäksi olosuhteet oletettiin Etelä-Suomea vastaaviksi. Lähtötilanteessa hakkuutähteet jätettiin maatumaan. Bioenergiaksi käytettäessä hakkuutähteet poltettiin hakkuiden aikaan. Biogeeninen hiilivelka määritettiin lähtötilanteen ja bioenergiankäyttö-skenaarion hiililaseiden erotuksena. Päästöt oletettiin tapahtuvan joko sykäyksittäin, jolloin hakkuutähteet käytettiin hakkuuvuonna, tai asteittain tapahtuviksi, jolloin vuosittain käytettiin tietty määrä hakkuutähteiden biomassaa. Kumulatiivinen lämmitysvaikutus määritettiin laskemalla vapautuneen hiilidioksidin määrä biomassan käytön aiheuttamasta sykäyksestä ajassa 0:

$$AGWP_{\text{bio}}(T) = \int_0^T RF(S_{\text{bio}}(t))dt, \text{ missä}$$

$S_{\text{bio}}(t)$: ilmakehän hiilidioksidipitoisuus biomassankäytön aiheuttamasta päästösykäyksestä.

Vastaava yhtälö fossiilisen polttoaineen tapauksessa esitettiin:

$$AGWP_{\text{fos}}(T) = \int_0^T RF(S_{\text{fos}}(t))dt, \text{ missä}$$

$S_{\text{fos}}(t)$: ilmakehän hiilidioksidipitoisuus fossiilisen polttoaineen aiheuttamasta päästösykäyksestä.

Biogeenisen hiiliyksikön käytön nettoviilennysvaikutus verrattuna fossiiliseen polttoaineen käyttöön:

$$AGWP_{\text{biouse}}(T) = \int_0^T (RF(S_{\text{displ}}(t)) + RF(S_{\text{seq}}(t)))dt, \text{ missä}$$

S_{displ} : ilmakehän CO₂-pitoisuuden vähentymä energiankäytön ja materiaalin korvaamisesta

S_{seq} : ilmakehän CO₂-pitoisuuden vähentymä biotuotteiden hiilensidonnasta

Kun päästöt tapahtuivat sykäyksittäin, saatiin biogeenisen hiilivaraston ja kumulatiivisen, korvutun fossiilisen polttoaineen summan takaisinmaksuajaksi 9 vuotta ja kumulatiivisen lämpenemisen takaisinmaksuajaksi 18 vuotta. Asteittain tapahtuvilla päästöillä vastaavat luvut olivat 21 ja 32 vuotta, eli huomattavasti suuremmat.

Kolmanneksi verrattiin runkopuun käytön hyötyjä rakentamisessa betonin käyttöön. GWP-pohjaisen indikaattorin mukaan takaisinmaksuajaksi laskettiin 36 vuotta. Hiilivarannon ja korvatus fossiilisen polttoaineen summana lasketuksi takaisinmaksuajaksi saatiin 23 vuotta. Jokaisessa skenaariossa fossiilisen polttoaineen korvaavuuden laskettiin siis pienentävän takaisinmaksuaikaa. (Pingoud ym. 2012)

Repo ym. (2011) tutkivat Yasso07- ohjelman avulla hakkuutähteiden bioenergiankäytöstä aiheutuvia epäsuoria päästöjä. Epäsuoriksi päästöiksi määritetään tilanne, jossa hakkuutähteistä vapautuu hiilidioksidia välittömästi polton yhteydessä sen sijaan, että se maatuisi luonnollisesti ympäristössä. Verrattaessa kantojen ja oksien epäsuoria päästöjä, maatumisnopeudella huomattiin olevan suuri vaikutus. Kantojen käytöstä aiheutui tutkimuksen mukaan suuremmat päästöt tuotettua energiayksikköä kohti, koska sen maatumisvauhti oli hitaampi. Epäsuorat päästöt suhteessa tuotettuun energiaan kuitenkin vähenevät ajan myötä, kun jo maatuneita hakkuutähteitä kerätään vanhemmilta hakkuualueilta. (Repo ym. 2011)

Repo ym. (2012) tutkivat edelleen Yasso07- ohjelman avulla hakkuutähteiden käytön vaikutuksia kasvihuonekaasupäästöihin. Tutkimuksen mukaan hakkuutähteiden käyttö pienentää metsän hiilivarastoa ja lisää näin ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuutta. Bioenergian käytön päästöt ovat suurimmillaan heti hakkuiden jälkeen ollen jopa fossiilisten polttoainepäästöjen tasolla, mutta pitkällä aikavälillä bioenergian käytöstä tulee kannattavampaa. Kuten Repo jo (2011) totesi, hakkuutähteiden maatumisnopeudella on huomattava vaikutus kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen bioenergiankäytöllä. Tutkimuksen mukaan bioenergiankäytön ilmastohyötyjä voisikin parantaa käyttämällä nopeammin maatuvaa biomassaa. (Repo ym. 2012)

Guest ym. (2013) arvioivat myös hakkuutähteiden käytön vaikutuksia ilmastoon hyödyntäen Yasso07- mallia. Skenaariona oli boreaalinen tasaikäismetsä 100 vuoden kiertokaudella. Hakkuutähteiden hyödyntämisestä arvioitiin yhdeksän eri tyyppin mukaan, mm. kannot, oksat, lehdet. CO₂- päästöjen hajoaminen ilmakehässä yli ajan ja myöhempi uudelleenkasvu estimoitiin Cherubinin ym. (2012) johtamalla yhtälöllä:

$$f(t)_i = \int_0^t e(t')_i y(t-t') dt' - \int_0^t g(t')_i y(t-t') dt', \text{ missä}$$

$f(t)$: biomassan CO₂- päästöjen aiheuttama ilmakehän CO₂- pitoisuuden muutos

$e(t')$: biomassan CO₂- päästöjen määrä yli ajan

$y(t)$: IRF Bern 2.5CC- mallista

Tutkimuksen mukaan ensimmäisen 20 vuoden aikana suurin osa hakkuutähdetyypeistä aiheutti suuremman GWP-pulssin, kuin vastaava yksikkö fossiilisia polttoaineita. 100 vuoden aikajaksolla hakkuutähteiden hiilidioksidipäästöt olivat kuitenkin vain n. 44–62% fossiilisten polttoaineiden päästöistä. (Guest ym. 2013)

Zanchi ym. (2012) vertasi puupohjaisen bioenergian ja fossiilisen polttoaineen käytön aiheuttamia päästöjä. Tutkimuksessa selvitettiin kolmen eri biomassan tuotannon lisäämistavan hyötyjä verrattuna kivihiileen, öljyyn ja maakaasuun. Nämä kolme tapaa olivat hakkuiden lisääminen, hakkuutähteiden hyödyntäminen, sekä maan muuttaminen puuplantaasiksi. GORCAM-ohjelmistoa käytettiin simuloimaan edellä mainittuja metsänhoidon ja maankäytön vaikutuksia verrattuna fossiilisten polttoaineiden käyttöön.

Fossiilisten polttoaineiden skenaariossa päästöt laskettiin vapautuneen hiilidioksidin mukaan, mutta bioenergian käytön skenaariossa näitä päästöjä ei laskettu, koska ne korvasivat fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Lisäksi tuotantoketjun päästöt jätettiin huomiotta.

Biomassan poltosta syntyvät päästöt fossiilisia polttoaineita korvattaessa on esitetty yhtälöllä:

$$E_{CB}(t) = (BC_B(t) - BC_{FF}(t)) * 44/12, \text{ missä}$$

$BC_B(t)$: metsän hiilivarasto biomassan polton skenaariossa.

$BC_{FF}(t)$: metsän hiilivarasto fossiilisten polttoaineiden käytön skenaariossa.

Vastaava yhtälö fossiilisten polttoaineiden käytön tapauksessa:

$$E_{CFF}(t) = (FC_{FF}(t) - FC_B(t)) * 44/12, \text{ missä}$$

$FC_{FF}(t)$: hiilivarasto fossiilisissa polttoaineissa fossiilisten polttoaineiden käytön skenaariossa.

$FC_B(t)$: hiilivarasto fossiilisissa polttoaineissa biomassan polton skenaariossa.

Hiilineutraaliusfaktori $CN(t)$ määritettiin kuvaamaan biomassan polton etuja fossiilisten polttoaineiden käyttöön nähden:

$$CN(t) = (ECFF(t) - ECB(t))/ECFF(t) = 1 - ECB(t)/ECFF(t)$$

Kun päätehakkuiden määrää lisättiin 60%:sta 80%:iin metsän vuotuisesta kasvusta, bioenergian käyttö tulisi kannattavaksi vasta n. 175 vuoden kuluttua verrattuna kivihiileen käyttöön ja n. 300 vuoden kuluttua verrattuna maakaasun käyttöön. Tapauksessa, jossa tarjontaa lisättiin jatkuvalla biomassan korjuulla 60%:sta 80%:iin maanpäällisestä biomassasta, tulisi bioenergian käyttö kannattavaksi kivihiileen verrattuna n. 230 vuoden ja maakaasuun verrattuna n. 400 vuoden kuluttua. Skenaariossa, jossa hakkuutähteet käytetään bioenergian tuotantoon korvaamaan fossiilisia polttoaineita, olisi bioenergian käyttö jo alusta lähtien kannattavampaa kivihiileen verrattuna, 7 vuodessa kannattavampaa verrattuna öljyyn, sekä 16 vuotta verrattuna maakaasuun. Tässä skenaariossa 25 % kaadettujen puiden biomassasta on hakkuutähteitä, joista 14 % käytetään bioenergian tuotantoon. (Zanchi ym. 2012)

Puuplantaasi-skenaariossa otettiin huomioon alkuperäisen maaperän vaikutus hiilivaraston muutokseen vertaamalla kolmea eri tapausta. Ensimmäinen tapaus käsitteli maatalousmaata (A), toinen metsämaan muuttamista nopeasti kasvavaksi plantaasiksi 10 vuoden kiertoaajalla (B) ja kolmas metsämaanmuuttamista hitaammin tuottavaksi plantaasiksi 20 vuoden kiertoaajalla (C). Tapauksessa A plantaasiksi muuttaminen kasvattaa nopeasti sekä maaperän että biomassan hiilivarastoa, kun samalla fossiilisten polttoaineiden päästöt kasvavat kumulatiivisesti. Hiilensidonta säilyy kuitenkin positiivisena. Tapauksessa B hiilivelka olisi maksettu takaisin 17 vuotta päätehakkuun jälkeen korvattaessa kivihiiltä. Öljyä korvattaessa tämä aika on 20 vuotta ja maakaasun tapauksessa 25 vuotta. Tapauksessa C takaisinmaksuaika on kivihiiltä korvattaessa 114 vuotta, öljyä korvattaessa 145 vuotta ja maakaasua korvattaessa 197 vuotta. (Zanchi ym. 2012)

3.4. Yhteenveto tutkimusten tuloksista

Maantieteellinen sijainti, puulaji ja kiertoaika vaikuttavat hiilensidonnan määrään ja takaisinmaksuaikoihin. Puun hidas kasvuvauhti pidentää takaisinmaksuaikaa, kun taas nopeampi kasvuvauhti lyhentää takaisinmaksuaikaa (Bernier ja Paré 2013). Tarkasteleman tutkimukset osoittavat, että hiilensidonta ja hiilivarasto kasvaa kiertoajan pidentyessä tiettyyn pisteeseen asti (mm. Repo ym. 2015). Kun hakkuumäärää lisätään, metsän hiilivarastot vastaavasti pienenevät. Hiilensidonnan määrä tietyssä ajanjaksona riippuu puulajin ohella mm. puiden kasvuvauhdista ja (Seely ym. 2002). Hakkuutähteiden hyödyntäminen bioenergiankäyttöön vähentää koko metsän hiilivarastoa. Jos hakkuutähteet jätetään maatumaan, maaperän hiilivarasto kasvaa (Repo ym. 2015).

Hakkuutähteiden käytöllä näyttää olevan suuri vaikutus bioenergiankäytön päästöihin ja GWP:iin (mm. Pingoud ym. 2012, Repo ym. 2012). Myös valinta hakkuutähteiden käytön ja käyttämättä jättämisen välillä bioenergiantuotannossa vaikuttaa ilmaston lämmityspotentiaaliin. Lisäksi on huomattava eri hakkuutähdetyypin ominaisuudet. Hitaammin maatuvat kannot aiheuttavat esim. suuremmat epäsuorat päästöt, kuin nopeammin maatuvat oksat (Repo ym. 2011).

Tarkasteltavalla ajanjaksolla, raaka-aineen tyypillä, sekä teoreettisilla arvioilla energiatehokkuudesta on vaikutusta fossiilisen polttoaineen korvaamisen arvioituihin hyötyihin. Lisäksi hakkuutähteiden käyttö, käyttämättä jättäminen ja hakkuutähdetyypin vaikuttavat bioenergiankäytön hyötyihin suhteessa fossiilisiin polttoaineisiin. Kun bioenergian käyttöä verrataan fossiilisten polttoaineiden käyttöön, takaisinmaksuajaksi saadaan kiertoaikaa pidentämällä lähes aina pienempiä arvoja (Cherubini ym. 2011a, 2011b).

Tutkimusten tuloksista voi päätellä, ettei metsävarojen käyttöä voida pitää hiilineutraalina. Huomioitavaa kuitenkin on, että esim. kiertoajan, puulajin, sekä hakkuutähteiden käytön valinta vaikuttavat saatuihin tuloksiin huomattavasti. Seuraavassa kappaleessa tarkastelen, kuinka taloustieteellisen näkökulman sisällyttäminen vaikuttaa tutkimusten tuloksiin.

4. TALOUSTIETEELLISET TUTKIMUKSET

4.1. Mallit ja ominaispiirteet

Edellä tarkastellut luonnontieteelliset tutkimukset eivät ottaneet huomioon taloustieteen realiteetteja. Onkin tärkeää, että hiilineutraaliutta tarkastellaan myös taloustieteellisestä näkökulmasta. Esimerkiksi markkinat, verot ja tukiaiset vaikuttavat siihen, kuinka optimiratkaisu hiilineutraaliudessa voitaisiin saavuttaa. Mallien ratkaisut sisältävät matemaattista johtamista analyttisin menetelmin. Malleja, sen oletuksia ja rajoitteita muokataan tutkittavan kohteen mukaan. Osassa tutkimuksia on käytetty empiirisesti saatuja arvoja, jotka ovat ratkaistu numeerisesti tietokoneohjelmalla. Käsiteltävissä tutkimuksissa on käytetty useita eri malleja (taulukko 2). ja matemaattisia analyyseja tulosten saamiseksi. En ole avannut kaikkia malleja tai analyysin osia yksityiskohtaisesti, vaan olen poiminut niistä tutkimuksesta riippuen pääkohdat. Kaikki tutkimukset eivät kuitenkaan ole puhtaasti taloustieteellisiä. Esimerkiksi Holtsmarkin (2015a, 2015b) tutkimuksissa on käytetty myös luonnontieteellisiä malleja.

Tutkimus	Mallit
1. Holtsmark (2012)	"Overlapping-generations" model of parcels with different stand ages
2. Holtsmark (2015a)	Model of the forest stand, model for accumulation of the carbon in the atmosphere
3. Holtsmark (2015b)	Model of the forest stand, model for accumulation of the carbon in the atmosphere and radiative forcing effects
4. Tahvonen (1995)	Dynamic general equilibrium model
5. Lintunen ja Uusivuori (2013)	Comprehensive forest sector model
6. Hoel ym. (2014)	Adjusted Faustmann rule with social cost of carbon
7. Daigneault ym. (2012)	Global economic model of forest and land use with carbon accounting routines
8. Asante ja Armstrong (2016)	Discrete dynamic programming model
9. Tahvonen ja Rautiainen (2017)	Forest vintage model (market-level age-class model with land allocation)
10. Sohngen ja Mendelsohn (2003)	Optimal control model of carbon sequestration, DICE

Taulukko 2. Tutkimusten mallit yksinkertaistettusti

Taloustieteellisissä tutkimuksissa tarkastellaan usein taloudellisen ohjauksen toimia. Hiilineutraaliudesta puhuttaessa näitä toimia ovat mm. verotus ja tukiaiset. Metsätaloudessa verolla ja tukiaisilla voidaan vaikuttaa metsänhoidollisiin toimiin, kuten hakkuihin ja metsänkasvatukseen. Niillä voidaan siis vaikuttaa metsän kierto-aikaan ja hiilensidontaan. Hiilensidonta on metsänkasvatuksen positiivinen ulkoisvaikutus, johon voidaan kannustaa tukiaisilla. Koska nimenomaan kasvava puu sitoo hiiltä, hiilensidonnan edut tulee laskea biomassan muutoksen funktiona. Veroa voidaan puolestaan käyttää metsänhakkuiden ja siitä seuraavien hiilidioksidipäästöjen ehkäisemiseksi, eli estämään negatiivinen ulkoisvaikutus. Jos katsotaan optimaalisen

kiertoajan mallia, johon on sisällytetty hiilensidonta, sekä vero ja tukiainen. Hiilidioksidin osuus, joka jää hakkuiden jälkeen varastoituneena pitkäaikaisiin puutuotteisiin merkitään β . Kun $\beta = 0$, kaikki hiilidioksidi vapautuu hakkuiden aikaan, jos $\beta = 1$, kaikki hiili säilyisi varastoituneena pitkäikäisiin puutuotteisiin. Tällöin, kun $\beta = 0$, optimaalinen kiertoaika on ääretön, koska metsää ei kannattaisi hakata koskaan. Jos $\beta = 1$, vero hiilidioksidipäästöistä olisi 0 ja kiertoajat lyhenisivät huomattavasti. (Van Kooten ym. 1995)

4.2. Katsaus tutkimuksiin ja niiden tuloksiin

Holtmark (2012) tutki, kuinka hakkuiden lisäys boreaalisissa metsissä puupohjaisten biopolttoaineiden tuottamiseksi vaikuttaa metsän hiilivarastoon ja CO₂-päästöihin. Mallin parametrit ja funktionaaliset muodot valittiin vastaamaan mahdollisimman realistisesti norjalaisen metsän dynamiikan ominaisuuksia.

Mallissa oli kiinteä joukko 75000 kpl eri-ikäistä palstaa, pinta-alaltaan 1 km²:n. Päätehakkuun jälkeen yhden palstan elävän biomassan arvo on 0, minkä jälkeen se alkaa taas kasvaa. Palstan elävän biomassan määrä on suoraan verrannollinen sen ikään, ja kasvuvauhti mukailee boreaalisen metsän kasvuvauhtia. Mallissa otetaan huomioon kuolleeseen puuhun sitoutunut hiili, olettaen yhden rungon sisältävän 48 % biomassaa. Toisaalta maaperän hiilivarasto jätetään kokonaan huomiotta. Jokaisella palstalla oletettiin olevan samat dynaamiset ominaisuudet elävän biomassan kasvuun ja kuolleen orgaanisen aineen kertymiseen liittyen. Tutkimuksen malli on rakentunut seuraavallisesti:

Koko metsikön elävän biomassan määrä (B_t), elävän biomassan määrä palstassa i ajassa t (B_{it}):

$$B_t = \sum_{i \in I} B_{it}$$

Palstan biomassan volyymi riippuu edellisen päätehakkuun ajankohdasta:

$$B_{it} = B(\tau_i(t))$$

Hakkuuvolyymi H_t ajassa t :

$$H_t = w \sum_{i \in F} B(\tau_i(t)), \text{ missä:}$$

w : korjatun biomassan osuus

Hakkuutähteiden määrä:

$$\Delta H_t = (1 - w)/w H_t$$

Kuolleiden puiden määrä palstalla i periodilla t :

$\Delta_{Nit} = d_{ti(t)}B(\tau_i(t))$, $i=1, \dots, n$, missä: (d) on elävien puiden määrä lohossa metsikön iässä (τ), jotka eivät selviä seuraavaan periodiin

Kuolleen puun kokonaismäärä:

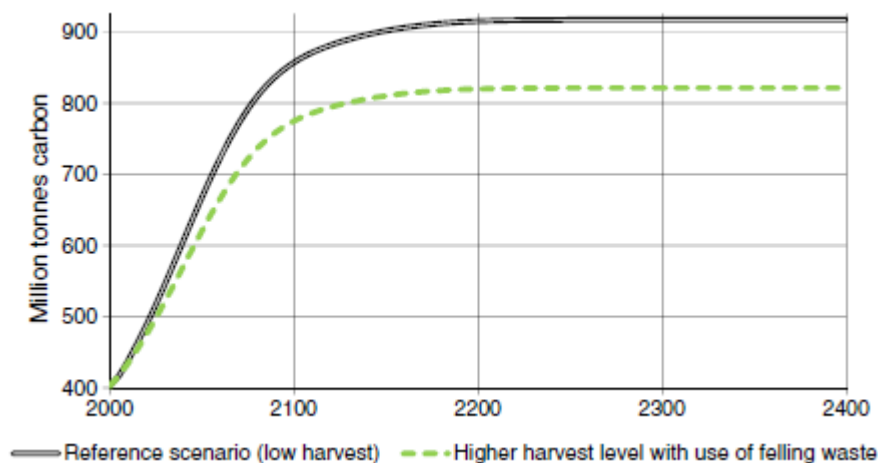
$$\Delta_{Nt} = \sum_{i=1}^n \Delta_{Nit}$$

Hakkuutähteiden ja kuolleen puun kokonaismäärä koko metsikössä:

$$D_{jt} = \sum_{\tau=0}^T \alpha_j(\tau) \Delta_{jt-\tau}, j = N, H.$$

Kiertoajan ja hiilivaraston suhdetta eri tasapainotiloissa esitettiin. Suuri hakkuumäärä ja lyhyt kiertoaika johtaa pieneen hiilivarastoon, ja vastaavasti pieni hakkuumäärä ja pitkä kiertoaika suureen hiilivarastoon. Hakkuumäärien pysyvä lisääminen johtaa pienempään hiilivarastoon myös pitkällä aikavälillä, koska suurempi hakkuumäärä johtaa lyhyempään kiertoaikaan. Maksimaalinen hakkuumäärä on n. 90 vuoden kohdalla, jolloin hiilensidonta on yhteensä n. 467 MtC. 250 vuoden kiertoajalla metsän hiilinielu olisi melkein kaksinkertainen, n. 933 MtC. Hakkuiden pysyvä lisääminen vähentää siis metsän hiilivarastoa pysyvästi.

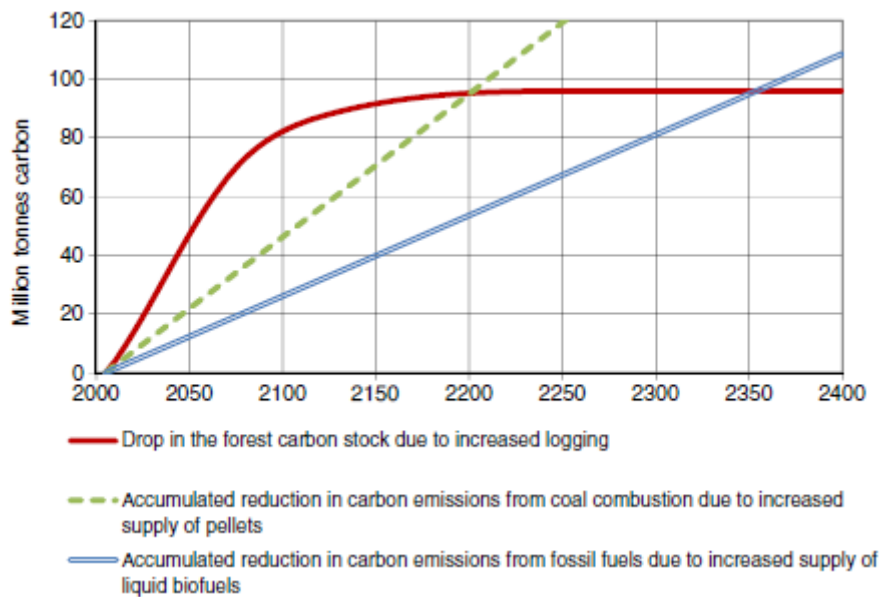
Toisessa skenaariossa vuosittaisiksi hakkuiksi oletettiin 10 Mm^3 , ilman hakkuutähteiden keräämistä. Kuvasta 1 nähdään, kuinka skenaariossa, missä metsää hakataan harvemmin on suurempi hiilivarasto. Esim. v. 2200 hiilivarasto on n. 90 MtC suurempi, kun metsää hakataan vähemmän. (Holtsmark 2012)



Kuva 1. Sitoutuneen hiilen määrä suurten ja pienten hakkuiden skenaarioissa. Holtsmark (2012)

Samassa tutkimuksessaan Holtsmark (2012) tarkasteli bioenergian käytön lisäämisen kannattavuutta suhteessa fossiilisiin polttoaineisiin. Ensimmäisessä skenaariossa oletuksena oli, että puuta käytetään pellettien tekoon kivihiilen korvaamiseksi. 1 m^3 :n pellettien käytön oletettiin vähentävän 0,5 tonnia fossiilisten polttoaineiden hiilidioksidipäästöjä. Toisessa skenaariossa puusta valmistetaan toisen sukupolven biopolttoaineita, jolloin 1 m^3 puuta oletetaan vähentävän 0,28 tonnia fossiilisten polttoaineiden päästöjä. Molemmissa skenaarioissa vuotuisia hakkuita on lisätty $3,6\text{ Mm}^3$:lla. Laskut perustuivat teoreettisiin arvioihin pellettien ja kivihiilen tuottamasta energiasta ja niiden päästöistä.

Kuva 2 näyttää, että pellettien käytöllä hiilivelka olisi maksettu takaisin v. 2200, jolloin takaisinmaksuaika olisi n. 190 vuotta. Toisen sukupolven biopolttoaineiden käytön tapauksessa takaisinmaksuajaksi tulisi n. 340 vuotta. Tällöin biopolttoaineiden käyttö saattaa olla fossiilisia polttoaineita kannattamattomampaa pitkän takaisinmaksuajan vuoksi. Analyysin mukaan hakkuiden kasvattaminen ja puupohjaisten polttoaineiden käyttö kivihiilen sijaan saattaa kasvattaa hiilidioksidipäästöjä pitkällä aikavälillä. (Holtsmark 2012)



Kuva 2. Hiilidioksidipäästöjen väheneminen korvattaessa fossiilisia polttoaineita biopolttoaineilla ja hiilivaraston ero pienen ja suuren hakkuuskenaarion välillä. Holtsmark (2012)

Holtsmarkin (2015a) tutkimuksen tarkoituksena oli esittää ”paranneltu” metodi GWP_{bio} :n määrittämiseen biomassan poltosta. Skenaariota, jossa metsää ei hakata verrattiin skenaarioon, jossa metsä hakataan 100 vuoden iässä. Metsä oletettiin hakkuukypsäksi 100 vuoden iässä ja hiilivaraston olevan tällöin 162 tC. Hakkuuskenaariossa kaikki elävät puut korjataan metsiköstä, jolloin niiden polton seurauksena hiilivarasto laskee 39 tC, jolloin koko metsikön hiilivaraston on 123 tC. Hakkuiden jälkeen puut alkavat kasvaa uudestaan. Hiilivarastoon laskettiin puuston lisäksi hakkuutähteet, kuolleet puut, sekä kasvavien puiden kaikki osat, kuten mm. oksat, latvat ja juuret. Lisäksi hakkuiden vaikutus maaperän hiilivarastoon mallinnettiin. Lopuksi metodologia testattiin myös numeerisesti.

Tutkimuksessa puiden kasvufunktio kuvattiin:

$$G(\tau) = v_1(1 - e^{-v_2\tau})^{v_3}, \text{ missä}$$

$G(\tau)$: puun volyymi 1 ha alueella

τ : metsikön ikä

v_1, v_2, v_3 : parametrit

Elävä biomassa $B(\tau)$ metsikössä:

$$B(\tau) = \frac{1}{\theta} G(\tau), \text{ missä}$$

θ : puunrunkojen oletettu biomassapitoisuus 0.48

Kokonaisharvennus:

$$E(\tau_h) = G(\tau_h) + \sigma(B(\tau_h) - G(\tau_h)), \text{ missä}$$

σ : kerättyjen hakkuutähteiden osuus

IRF (5) kuvattiin:

$$y(t) = y_0 + \sum_{i=1}^3 y_i e^{-t/a_i}$$

Hiilen nettovaikutus ilmakehässä hakkuu- ja vapaan kasvun skenaariossa esitettiin:

$A(t) = A_H(t) - A_0(t)$, missä ilmakehän hiilidioksidipitoisuus hakkuuskenaariossa:

$$A_H(t) = E(\tau_h, \sigma) \cdot y(t) - \int_0^t \Omega'_H(k) y(t-k) dk$$

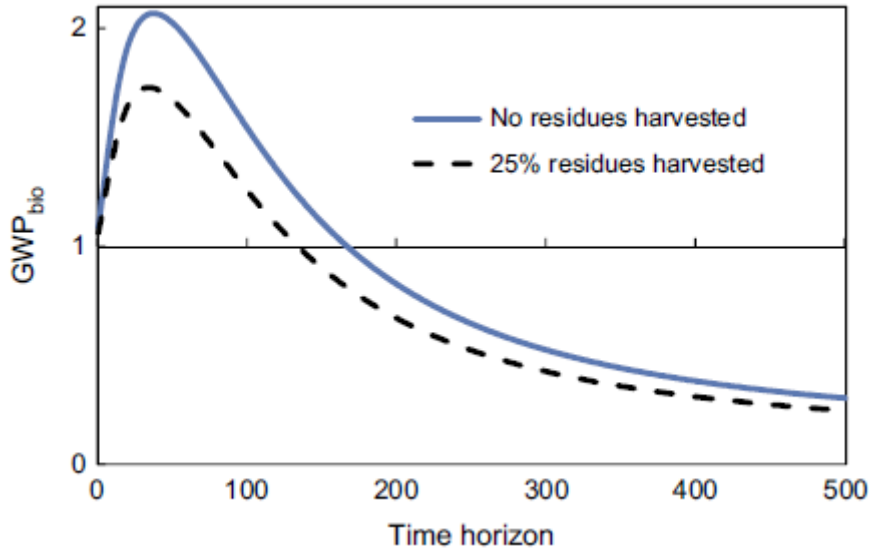
Ilmakehän hiilidioksidipitoisuus skenaariossa ilman hakkuuta:

$$A_0(t) = - \int_0^t \Omega'_0(k) y(t-k) dk.$$

Kun aiemmin Cherubinin ym. (2011a) esittämään AGWP yhtälöön lisätään $A(t)dt$:

$$AGWP_{\text{bioCO}_2}(T) = \int_0^T \alpha_{\text{CO}_2}(t) \cdot A(t) dt.$$

Tulosten mukaan GWPbio laskelmat saavat 2-3 kertaa suuremmat arvot, kuin aiemmissa tutkimuksissa, sekä merkittävästi suuremmat arvot, kuin hiilidioksidipäästöt fossiilisten polttoaineiden GWP:stä 100 vuoden aikajaksolla. Näin ollen lämmitysvaikeus jokaisesta hiilidioksidin päästöyksiköstä olisi hidaskasvuisen biomassan poltosta suurempi, kuin fossiilisista polttoaineista 100 vuoden aikajaksolla. Kuvasta 3 nähdään, että kun hakkuutähteitä ei hyödynnetä, kestää n. 30 vuotta kauemmin, että GWPbio ylittää arvon 1. Vaikka lämmityspotentiaali on pienempi, kun hakkuutähteet käytetään, on absoluuttinen lämmityspotentiaali kuitenkin korkeampi. Tämä johtuu siitä, että hakkuiden aikana syntyy päästöjä, sekä suurempi määrä poltettua biomassaa poltetaan. (Holtsmark 2015a)



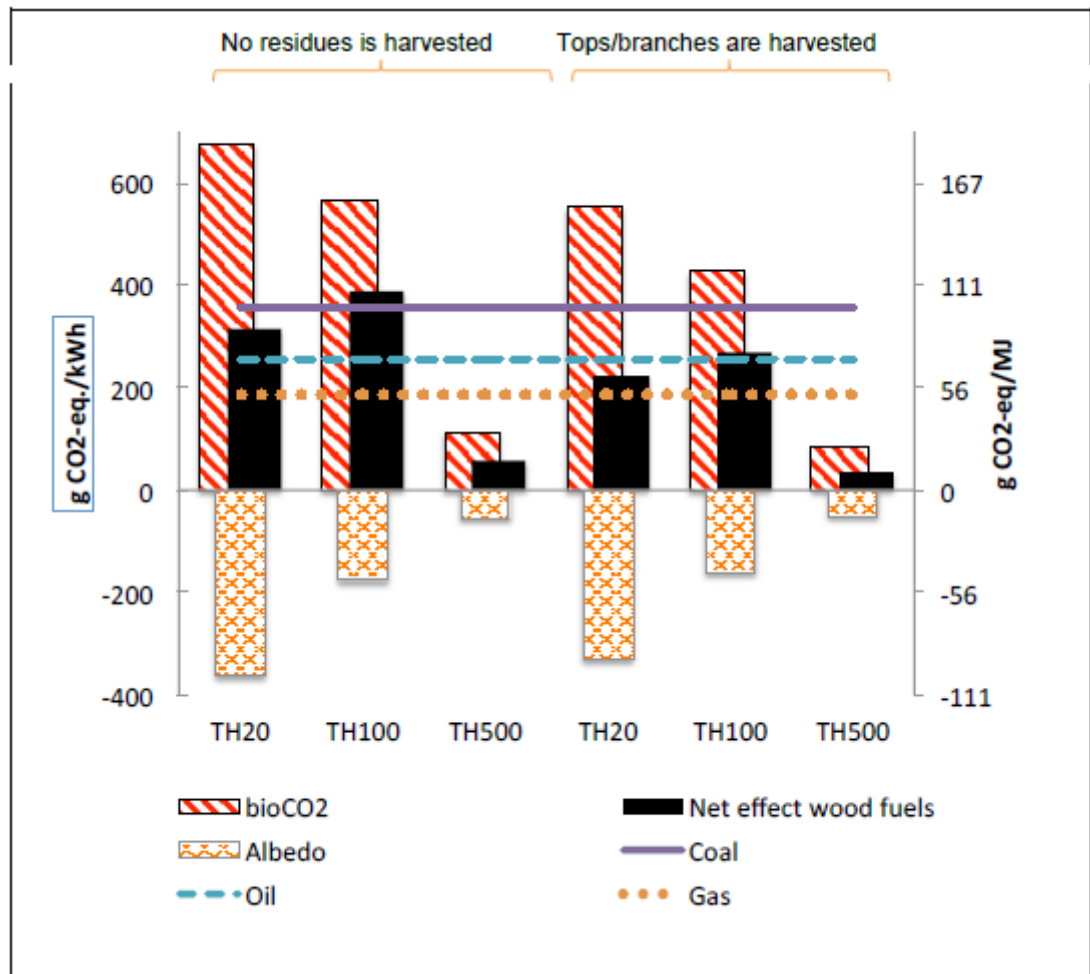
Kuva 3. GWP_{bio} eri hakkuutähteidenkäytön skenaariossa. Holtsmark (2015a).

Holtsmark (2015b) laajensi edellistä (2015a) tutkimusta lisäämällä siihen albedon vaikutuksen, vertailun potentiaalisista lämpövaikutuksista fossiilisten polttoaineiden kanssa, sekä linkittämällä Holtsmarkin (2015a) aineiston GWP_{bio} laskemisesta ja aineiston Holtsmarkin (2012) tutkimuksesta, joka käsittelee hiilivelkaa (carbon debt). Albedo kuvaa viilenemisvaikutusta, kun hakkuiden jälkeen lumipeite heijastaa aurion säteilyä takaisin (Holtsmark 2015, s.24). Laskut puupohjaisten- ja fossiilisten polttoaineiden tehokkuudesta ja päästöistä perustuivat teoreettisiin arvioihin pellettien ja kivihiilen tuottamasta energiasta ja niiden päästöistä. Tutkimuksessa Albedo määritettiin t vuotta hakkuiden jälkeen:

$$\Delta RF_{\text{albedo}}(t) = (1 - \delta_{\text{albedo}}) \cdot \Delta RF_{\text{albedo}}(0).$$

Kuvassa 4 on esitetty GWP:n yksittäisen metsikön tapauksessa, kun se hakataan aikajaksolla $t=0$. Kun albedoa ei huomioida, sekä 100 että 20 vuoden aikavälillä puupolttoaineiden lämpövaikutus on merkittävästi suurempi, kuin fossiilisilla polttoaineilla. Albedon vaikutus ja hakkuutähteiden keräys huomioiden, lämmitysvaikutus puupohjaisista polttoaineista on suunnilleen samalla tasolla, kuin öljystä 100 vuoden aikajaksolla. Jos hakkuutähteitä ei kerätä, on puupohjaisten polttoaineiden lämmitysvaikutus hiukan kivihiilen käyttöä korkeammalla tasolla 100 vuoden aikajaksolla. 500 vuoden aikajaksolla puupohjaisilla polttoaineilla on pienempi lämmitysvaikutus, kuin kaikilla kolmella fossiilisella polttoaineella. Albedon vaikutus on negatiivinen, koska hakkuut

lisäävät heijastusta ja näin ollen viilentävät ilmastoa. Albedon vaikutuksella on vain pieni ero, kun hakkuutähteet kerätään verrattuna keräämättä jättämiseen. Koska hakkuutähteitä kerätessä syntyy enemmän poltettavaa biomassaa, syntyy näin ollen myös enemmän päästöjä. Vaikka absoluuttinen albedo-efekti on suurempi, kun hakkuutähteet kerätään, on suhteellinen albedo-efekti pienempi, kun sitä verrataan korjatun biomassan määrään. (Holtsmark 2015b)



Kuva 4. Puu- ja fossiilisten polttoaineiden GWP ilmaistuna g CO₂:ssa per kWh, 100 %:n käyttöasteella. (Holtsmark 2015b)

Albedon viilentävää vaikutusta ilmastoon ei kuitenkaan voida tarkastella yksittäisesti. Tutkimusten mukaan (mm. Spracklen ym. 2008) metsän kasvillisuus päästää ilmastoon aerosoleja, joilla voi olla ilmastoon lämmittävä vaikutus. Näin ollen albedon ja

ilmaan päässeiden aerosolien välinen suhde tulee ottaa huomioon tarkasteltaessa metsän vaikutusta ilmastoon.

Edellä mainituissa Holtsmarkin (2012,2015a,2015b) tutkimuksissa ei käytetty perinteisiä taloustieteellisiä malleja, eikä ratkaisuille esitetty optimiehtoja. Esimerkiksi Holtsmarkin (2012) tutkimuksen malli ”overlapping generations” oli suurilta itse sovellettu.

Tahvosen (1995) tutkimuksessa analysoitiin oikeaa veron ja tukiaisen tasoa, jotta metsänomistajat ja muut puun hyödyntäjät saisivat sopivan kannustimen hiilensidontaan. Analyysissa käytettiin yleistä dynaamista tasapainomallia ja tilamuuttujina pääomaa sekä metsävarantoa. Tutkimuksessa:

Hakkuupotentiaalisen puun kasvu $F[x(t)]$, missä hakkuumäärä: $h(t)$ ja metsävaranto: $x(t)$. $F[\cdot]$ oletetaan konkaaviksi, kun $F[0] = F[\bar{x}(t)] = 0$, missä \bar{x} on metsän maksimi-varanto metsämaan tapauksessa.

Maaperään sitoutunut hiili huomioon otettaessa kokonaishiilivirta esitettiin $\mu F[x(t)]$, missä $\mu \geq 1$. Maaperään sitoutuneen hiilen kertymistä kuvattiin $(\mu-1)F[x(t)]$ ja metsän biomassan hiilivaraston kertymistä $\dot{x} = F[x(t)] - h(t)$.

Veron/päästöhinnan valtakunnallinen nettomäärä esitettiin:

$\tau\{q(t) + h_1(t) + ah_2(t) - \mu F[x(t)]\}$, missä

τ : vero per tnCO₂ päästöjä, tai päästöhinta per tnCO₂

$q(t)$: CO₂-päästöt fossiilisen polttoaineen kulutuksesta

p_3 : fossiilisten polttoaineiden hinta.

$h_1(t)$: puunkäyttö polttoaineeksi

$h_2(t)$: puunkäyttö teollisuuden prosesseihin.

Pääoman varallisuus merkittiin $k(t)$ ja talouden tuotantofunktio $P(k, h_1, q, h_2)$. Kulutuksen taso merkittiin $c(t)$ ja konkaavi hyötyfunktio $U(c)$.

Päättäjän ongelma esitettiin:

$$\max_{\{q, h_1, h_2, c\}} W = \sum_0^{\infty} U(c)e^{-\delta t} dt$$

siten että $\dot{k} = P(k, h_1, q, h_2) - c p_3 q - \tau[q + h_1 + ah_2 - \mu F(x)]$,

$$k(0) = k_0,$$

$$\dot{x} = F(x) - h_1 - h_2, x(0) = x_0,$$

$$q \geq 0,$$

$$h_1 \geq 0 \text{ ja } h_2 \geq 0.$$

Hamiltonin käypä arvo ja optimin välttämättömät ehdot laskettiin. Optimaalinen metsävaranto olisi metsän rajakasvun vastatessa diskonttokorkoa tai MSY:n välillä. Tasapainotilassa $F(x) - h_1 - h_2 = 0$, jolloin $\tau[h_1 + ah_2 - \mu F(x)] < 0$. Koska $a < 1$ ja $\mu \geq 1$, tasapainotiloissa bioenergiasta syntyvien päästöjen nettoverot ovat negatiivisia. Vaikka potentiaalisesti kaadettavaksi kelpaava metsävaranto pysyy vakaana, puutuotteisiin ja maaperään kerääntyä sitoutunutta hiiltä. Jos fossiilisia polttoaineiden käyttöaste pysyy tarpeeksi alhaisena, voi valtion verotus hiilidioksidipäästöistä olla negatiivista, jolloin valtio voi saada nettotuloja verotuksesta. (Tahvonen 1995)

Hajautetun talouden tilanteessa esitettiin kansainvälinen verotaso (τ) kaikille hiilidioksidipäästöille päästölähteestä huolimatta. Tukiainen $\tau\mu F(x)$ esitettiin maksettavaksi metsänomistajille sidotun hiilivaraston mukaan. Talouden oletettiin sisältävän metsänomistajan lisäksi yrityksen ja hallituksen, joiden toimet vaikuttavat toisiinsa taloudellisesti.

Metsänomistajan ongelma esitettiin funktiolla:

$$\max_{\{c, h_1, h_2\}} W_2 \int_0^{\infty} U(c) e^{-\delta t} dt$$

$$\text{siten että } \dot{k} = \pi + rk - c + p_1 h_1 + p_2 h_2 + \tau\mu F(x), k(0) = k_0$$

$$\dot{x} = F(x) - h_1 - h_2, x(0) = x_0$$

$$h_1 \geq 0, h_2 \geq 0.$$

Metsänomistajan välttämättömät ehdot määritettiin, kun pääoman varjohintaa kuvasi (σ) ja puun varjohintaa (ϕ):

$$U'(c) - \sigma = 0,$$

$$\sigma p_1 - \phi = 0,$$

$$\sigma p_2 - \phi = 0,$$

$$\dot{\sigma} = \sigma (\delta - r),$$

$$\dot{\phi} = -\sigma \tau \mu F'(x) + \phi [\delta - F'(x)],$$

$$\dot{k} = \pi + rk - c + p_1 h_1 + p_2 h_2 + \tau \mu F(x), k(0) = k_0,$$

$$\dot{x} = F(x) - h_1 - h_2, x(0) = x_0$$

Yrityksen ongelma esitettiin:

$$\max_{\{k, h_1, q, h_2\}} \pi = P(k, h_1, q, h_2) - rk - (p_1 + \tau) h_1 - (p_2 + \alpha \tau) h_2 - (\tau + p_3) q$$

Jonka optimin välttämättömät ehdot olivat:

$$P_k = (k, h_1, q, h_2) - r = 0,$$

$$P_{h_1} = (k, h_1, q, h_2) - p_1 - \tau = 0,$$

$$P_{h_2} = (k, h_1, q, h_2) - \alpha \tau - p_2 = 0,$$

$$P_q = (k, h_1, q, h_2) - p_3 - \tau = 0.$$

Päättäjän ongelman välttämättömiä ehtoja ja hajautetun talouden ehtoja verrattiin.

Ehdot vastasivat riittävästi toisiaan, joten hajautetun talouden ehdotettu vero- ja tukiaispolitiikka vastasi päättäjän optimaalista ratkaisua.

Tutkimuksen mukaan myös puun poltosta syntyviä CO₂-päästöjä verottamalla metsien tuottavuus kasvaa ja metsävarannon tasapainotilan (steady state) taso nousee. CO₂-päästöt tulisi verottaa erikseen raaka-aineen mukaan riippumatta siitä, onko kyseessä fossiilinen- vai puupohjainen polttoaine. Kun tasapainotilan taso nousee, metsänomistajien tulisi tuottaa positiivisia ulkoisvaikutuksia, jolloin tarvitaan tukiaisia. Optimaalinen tukiainen vastaisi metsään sidotun hiilen määrän ja kansainvälisen päästöluvan hinnan tuloa. (Tahvonen 1995)

Lintunen ja Uusivuori (2013) tutkivat, kuinka oikealla politiikalla voidaan tukea puun käyttöä tehokkaasti. He pyrkivät maksimoimaan kaikki biomassan aiheuttamat hyödyt ilmaston lämpenemisen torjunnassa. Tutkimuksessa verrataan myös kahta laskentatapaa hiilivaraston muutokselle. CPO (physical carbon oxidation)- laskentatavassa raakapuunkäyttö on veronalaista toimintaa, kun taas IPCC-laskentatavassa

hiilivaraston muutos määrittää veron määrän. Siinä verotetaan metsänomistajaa hakkuuhetkellä, ja myöhempää puunkäyttöä pidetään hiilineutraalina, jotta kaksinkertaiselta laskennalta vältetään.

Tutkimuksessa kotitaloudet kuluttavat tuotetta y_t . Kuluttajan bruttoylijäämä määritettiin hyötyfunktioilla $u(y_t)$. Kotitalouksien jaksollinen kokonaishyvinvointi oletettiin riippuvan kulutuksen hyödyistä ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden haitoista S_t^{ATM} :

$U(y_t, S_t^{ATM}) = u(y_t) - D(S_t^{ATM})$, missä lopputuotteen tuotantofunktio:

$y_t = y(z_t, w_t^L, w_t^P, E_t)$, missä z_t on uusiutumaton raaka-aine, w_t^L on tukkipuu ja w_t^P on kuitupuu.

Energiasektorin tuotantofunktio esitettiin:

$E_t = E(f_t w_t^E, w_t^{RES}, w_t^{HWP})$, missä f_t on fossiilinen polttoaine, w_t^E on raakapuu, w_t^{RES} on hakkuutähteet ja w_t^{HWP} on kierrätyspuuta. Tuotantopanoksille määritettiin myös yksikkökustannukset.

Hiilenkiertomalliin sisällytettiin useita hiilivarastoja: ilmakehän- (ATM), kuolleen orgaanisen aineen- (DOM), sekä puutuotteiden hiilivarastoa (HWP). Kasvavan biomassan hiilivarasto määritettiin dynaamisella ikäluokkamallilla.

Hakkuuvalinta ($\theta_a \in [0,1]$) mallinnettiin jokaiselle ikäluokalle ($a \in \{1, \dots, A\}$) siten, että metsä päätehakattiin ja uudistettiin joka periodin alussa. Metsikön ikäluokkajakauman ($x_t = x_{1t}, \dots, x_{At}$) dynamiikka esitettiin ikäluokkamallilla:

$$x_{1,t+1} = \sum_{a=1}^A \theta_{at} x_{at}$$

$$x_{a+1,t+1} = (1 - \theta_{at}) x_{at}$$

$x_{A,t+1} = \sum_{a=A-1}^A (1 - \theta_{at}) x_{at}$, missä vanhimman ikäluokan metsän ei enää oletettu kasvattavan biomassaa.

Hakkuuiden kokonaistuotos kaikista ikäluokista yhteensä esitettiin:

$$H_t = H(\theta_t, x_t) := \sum_{a=1}^A q_a \theta_{at} x_{at}.$$

Raakapuun biomassavarannon ($B_t = \sum_a q_a x_a$) muutos esitettiin:

$B_{t+1} = B_t - H_t + G_t$, missä biomassan kasvu:

$$G_t = G(\theta_t, x_t) := \sum_{a=1}^A [q_1 \theta_{at} + g_a q_a (1 - \theta_{at})] x_{at}.$$

Tutkimuksessa päättäjä maksimoi hyvinvoinnin nettonykyarvon kotitalouksien netto-tuotantokustannuksista. Päättäjän ongelma esitettiin:

$$\max_{\substack{\{dt\} \\ \infty \\ t=0}} \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t [u(y_t) - D(S_t^{\text{ATM}}) - C_t], \text{ missä}$$

$$\text{kustannukset } C_t: p_{Zt} z_t - p_{ft}^f - c_H H_t - c_{REG} \sum_a x_a \theta_a - c_{RES}(w_t^{\text{RES}}, H_t) - c_{HWP} w_t^{\text{HWP}}$$

$$\text{diskonttokorko } \beta: (1 + r)^{-1}$$

PCO:n ja IPCC:n laskentatapoja hiilivaraston muutoksesta verrattiin käyttäen Lagran-gen menetelmää ja määrittäen ensimmäisen kertaluvun ehdot molemmille laskentata-voille. Tuloksien mukaan toimijat käyttäytyvät samalla tavalla huolimatta kumpaa las-kentatapaa käytetään. Raakapuun markkinahinta on korkeampi IPCC:n laskentatapaa käytettäessä. Tämä hintaero vastaa CO₂- päästöjen aiheuttamaa yhteiskunnallista raja-kustannusta.

Hajautettujen markkinoiden tapauksessa markkinat koostuvat metsänomistajista ja yri-tyksistä, jotka tuottavat lopputuotetta. Toimijat optimoivat toimintansa erikseen ja kil-pailullinen markkinatasapaino jakaa resurssit tehokkaasti. Metsänomistajat pyrkivät maksimoimaan hakkuutulojen nettonykyarvon ja valitsevat joka ikäluokalle hakkuu-alueen ja määrän, jota hakkuutähteitä kerätään. Lisäksi puutuotteista saatavan hukka-puun arvo puunpoltossa huomioidaan tulevien puupolttoainehintojen valossa, joten sen arvo maksimoidaan.

Jos hiilen yhteiskunnallinen kustannus on nolla, hajautettujen markkinoiden tasapai-notila vastaa päättäjän ongelman tasapainotilaa. Markkinatoimijat eivät kuitenkaan ota huomioon hiilen ulkoisvaikutuksia, joten ilmakehän ja kuolleen orgaanisen aineen hii-livarastoja ei otettu huomioon hajautettujen markkinoiden optimointiongelmassa.

Optimipolitiikkaa määriteltäessä hiilidioksidipäästön hinta vastasi hiilen yhteiskunnal-lista kustannusta. Hiilen yhteiskunnallinen kustannus määritettiin päästöyksikön raja-haitan nettonykyarvona. Korkea diskonttokorko ja hiilidioksidin hajoamisaste ilmake-hässä pienentäisi yhteiskunnallista kustannusta. Mitä nopeammin maatuivia tai hajoavia tuotteet ja kuollut orgaaninen aine on, sitä suuremmat yhteiskunnalliset kustannukset ne aiheuttavat.

Optimaalinen vero määritettiin ajasta riippuvan ”tehokkaan päästötekijän” ja yhteiskunnallisen kustannuksen mukaan. Päästötekijät määritettiin erikseen IPCC:n ja PCO:n laskentatavoille. IPCC:n laskentatavassa myös raakapuun käytöstä maksettaisiin veroa, koska kuolleen orgaanisen aineen määrä lisääntyy hakkuiden seurauksena. Tukiainen määritettiin perinteisesti kasvavan puun sitoman hiilen mukaan. Tällöin pitkäaikaisempi hiilivarasto voisi oikeuttaa suurempaan tukiaiseen, koska sen suhteelliset yhteiskunnalliset rajakustannukset olisivat pienemmät.

Herkkyysanalyysissä testattiin eri parametrien muutosten vaikutusta tuloksiin. Sen antamien tulosten mukaan korkea diskonttokorko johtaa verrattain suurempaan raakapuunkäyttöön ja vähentää hakkuutähteiden energiakäyttöä. Kuolleen orgaanisen aineen ja puutuotteiden kasvava maatumisaste kasvattaa yhteiskunnan rajakustannuksia, mutta diskonttokoron nousu johtaa näiden kustannusten vähenemiseen. Kuolleen orgaanisen aineen pidempi elinikä kasvattaa hakkuutähteiden päästökerrointa, jolloin hakkuutähteiden käyttö tulee kannattamattommaksi. Hiilen korkea yhteiskunnallinen kustannus, kuolleen orgaanisen aineen keskimääräisen iän ollessa 100 vuotta, voisi johtaa raakapuun käytön kannattavuuteen sekä fossiilisten polttoaineiden että hakkuutähteiden korvaamiseksi energiantuotannossa. Lisääntyvä raakapuun käyttö ei mahdollistaisi biomassan kasvua yhtä paljon, kuin kuolleen orgaanisen aineen pienempi elinikä. Kiertoaika kasvoi MSY:n yli, kun hiilen yhteiskunnallinen kustannus oli korkea. Jos fossiilisten polttoaineiden toimiala on huomattavasti metsäsektoria suurempi, tulee fossiilisten polttoaineiden käyttö kannattavammaksi. Kun raakapuun hinta on tarpeeksi alhainen, kaikki mahdollinen raakapuu voidaan ottaa energiakäyttöön ilman, että se vaikuttaa juurikaan energian hintaan. Suuri fossiilisten polttoaineiden toimiala voi heikentää metsän roolia ilmastonmuutoksen hillinnässä. (Lintunen ja Uusi-vuori 2013)

Puunkäytön suuremmalla päästökertoimella metsän kiertoaika ja biomassavaranto kasvaa, jolloin metsän rooli hiilinieluna paranee, mutta fossiilisten polttoaineiden korvaajana heikkenee. Hakkuutähteiden käytön lisäämisen näyttäisi vähentävän ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta. Aluksi ilmakehän hiilidioksidipitoisuus kasvaisi hakkuutähteiden maatumisen myötä, mutta vähenisi niiden käytön myötä. Kun puutuotteiden hiilivarastoa kasvatetaan pysyvästi, ilmakehän hiilidioksidipitoisuus ensin laskee, mutta ajan kuluessa puutuotteista alkaa vapautumaan hiilidioksidia takaisin ilmakehään Optimaalisessa politiikassa mistä tahansa puunkäytön aiheuttamista

hiilidioksidipäästöistä pitäisi maksaa veroja, huolimatta mitä hiilenlaskentatapaa käytetään. Lisäksi hakkuutähteiden maatumisen aiheuttamista päästöistä tulisi verottaa. Vastaavasti metsänkasvatuksesta olisi saatava tukiaisia, jonka määrittää sidottu hiilen määrä, puutuotteen elinikä, sekä diskonttokorko. (Lintunen ja Uusivuori 2013)

Lintusen ja Uusivuoren edellä mainittu tutkimus sisälsi hyvin paljon matemaattista analyysia ja eri skenaarioita testailtiin. Erilaiset tulokset kuvastavat hyvin sitä, kuinka parametrejä muuttamalla voidaan vaikuttaa tuloksiin. Toisaalta herkkyyshanalyysi on hyvä tapa testata mallien toimivuutta.

Hoel ym. (2014) sovelsivat optimaalisen kiertoajan laskemisessa Faustmannin sääntöä ottamalla huomioon hiilidioksidipäästöjen yhteiskunnallisen kustannuksen. Teoreettisessa tutkimuksessa pyrittiin ottamaan huomioon useiden hiilivarantojen dynamiikka ja kiertoaika oletettiin äärettömäksi. Metsän hiilivarastosta puolet oletettiin olevan sitoutuneena puunrunkoihin ja puolet oksiin, latvaan, juuriin ja kantoihin. Hakkuutähteiden energiankäyttöaste otetaan annettuna. Eri skenaarioita puunkäytöstä joko energiaksi tai puutuoteteollisuuteen tarkastellaan, koska tämä valinta vaikuttaa päästöihin. Optimaalista kiertoaikaa tutkittiin teoreettisesti ja numeerisesti. Tutkimuksessa:

Puut $R(t)$ sisältävät $\alpha \in (0,1)$ kokonaisbiomassasta ja metsänomistaja kerää $\sigma \in [0,1]$ hakkuutähteistä. Puista käytetään $\beta \in [0,1]$ pitkäaikaisiin puutuotteisiin. Kiertoajalla T kokonaisbiomassasta $B(T)$, kokonaisharvennus on $\alpha + \sigma(1-\alpha) \in [\alpha, 1]$.

Seuraavien hakkuutulosten nykyarvo määritettiin:

$$V_P(p, T, \sigma) = e^{-\delta T} p(\alpha + \sigma(1-\alpha))B(t), \text{ missä}$$

Hiilen hinnan ollessa vakio on hiilidioksidipäästöjen yhteiskunnallisen kustannuksen nykyarvo, kun biomassaa poltetaan heti hakkuuden jälkeen:

$$V_F(T, s, \beta, \sigma) = e^{-\delta T} s(\alpha(1-\beta) + \sigma(1-\alpha))B(t)$$

Seuraavaksi määritettiin pitkäaikaisten puutuotteiden kulutuksen päästöjen aiheuttamat yhteiskunnalliset kustannukset, ottaen huomioon hakkuutähteiden maatumisen metsässä. Lisäksi hiilensidonta kasvavaan puuhun sekä kuolleen puun kertyminen ja sen vaikutus yhteiskunnalliseen kustannukseen määritettiin. Hyvinvointifunktio sisältäen yhteenlasketun diskontatun hyvinvoinnin kaikista tulevista kiertoaika jaksoista esitettiin yksinkertaistaen:

$$W(\cdot) = \frac{1}{1-e^{-\delta T}} V(\cdot).$$

Kun yhteiskunnallinen hyvinvointi maksimoidaan rajallisen kiertoajan arvolla T , tämä arvo toteutuu:

$$\frac{B'(T)}{B(T)} = \delta / (1 - e^{-\delta T}) (1 - \frac{s}{\Omega} \Psi(T)), \text{ missä}$$

δ : diskonttokorko.

Yhteiskunnallisen hyvinvoinnin maksimoiva kiertoaika, kun hiilipäästöjen yhteiskunnallinen kustannus $s = 0$:

$$\frac{B'(T)}{B(T)} = \delta / (1 - e^{-\delta T}), \text{ mikä on Faustmannin määritelmä metsänomistajan tuoton maksimoinnille.}$$

Jos s ja $\delta = 0$:

$$\frac{B'(T)}{B(T)} = \frac{1}{T}$$

Tuloksien mukaan, jos hakkuista saadaan taloudellista voittoa ja yhteiskunnallisesti optimaalinen kiertoaika on rajallinen, niin optimaalinen kiertoaika pitenee, kun hiilidioksidipäästöjen yhteiskunnallinen kustannus otetaan huomioon. Tietyillä parametrien arvoilla rajallinen kiertoaika on optimaalinen huolimatta yhteiskunnallisten kustannusten suuruudesta. Hiilen yhteiskunnallisella kustannuksella voi olla raja-arvo, jonka ylittäessä metsää ei kannata hakata. Jos hakkuut aiheuttaisivat tappiota ja yhteiskunnallinen kustannus olisi tiettyä raja-arvoa alhaisempi, olisi optimaalinen kiertoaika ääretön. Yhteiskunnallisen kustannuksen ylittäessä tämän raja-arvon, voisi hakkuista saada yhteiskunnallista ylijäämää, riippuen parametreista. Tällöin optimaalinen kiertoaika lyhenisi yhteiskunnallisen kustannuksen myötä.

Daigneault ym. (2012) tarkastelivat tutkimuksessaan, kuinka metsän biomassankäytön painottaminen USA:n energiapolitiikassa vaikuttaa maailmanlaajuiseen puutavaran tuotantoon ja hiilivarastoon seuraavan 50 vuoden aikana. Mallina käytettiin dynaamista metsän- ja maankäytön mallia, jolla maksimoitiin kuluttajien ja tuottajien metsänhoidosta saadun ylijäämän nykyarvo. Tutkimuksessa verrattiin kahden tilanteen vaikutuksia hiilivarastoon: kun bioenergian kysyntä jätetään huomiotta (lähtötilanne), ja kun kysyntä huomioidaan, jolloin markkinat vaikuttavat metsänhoitoon ja näin ollen

myös hiilivarastoon (skenaario). Lisäksi metsäinvestointien vaikutusta hiilivarastojen muutokseen testattiin asettamalla skenaario, jossa maankäyttömuodon vaihto bioenergiantuotannoksi kiellettiin. Hiilensidonta laskettiin puiden lisäksi maaperästä, hakkuutähteistä ja puutuotteista. Hakkuutähteiden käytön vaikutuksia tarkasteltiin arvioimalla, vaikuttaako se taloudelliseen tehokkuuteen vai bioenergian tuotannon hiilitaseseen. Kun kysyntä otettiin huomioon, fossiilisesti tuotetun energian korvaaminen bioenergialla laskettiin mukaan.

Globaalin näkökannan vuoksi metsät jaoteltiin neljään eri kategoriaan eri ominaisuuksien ja geologisen sijainnin mukaan. ”Saavuttamattomissa” metsissä hakkuiden oletettiin tapahtuvan vain sen ollessa taloudellisesti kannattavaa. Metsänkäytön mallissa maksimoitiin metsäsektorin tuottaman nettohyvinvoinnin nykyarvo. Nettohyvinvointi määritettiin vähentämällä kuluttajan ylijäämästä metsätalousmaan kulut. Kuluiksi laskettiin vuokratulot maan säilyttämisestä metsämaana, sekä yleiset metsänhoitoon liittyvät kulut. Kuluttajan ylijäämä määritettiin kaupallisen puun globaalin kysyntäfunktion mukaan, mikä sisälsi vuosittaisen kaadetun puun volyymin ja vuosittaiset tulot. Globaali puutuotanto laskettiin jokaisen alueen tuotoksen summana. Yhden alueen kaadetun puun volyyymi määritettiin joka hehtaarilla kaadetun puun summana eri ikäluokissa. Funktio määrittä tarjolla olevan biomassan hehtaarilla ja puun volyyymi määritettiin metsänhoidon intensiivisyyden mukaan. Hiilivarastot jaoteltiin maanpäälliseen- maaperän-, puutuotteiden- sekä hakkuutähteiden hiilivarastoksi. Jokaisen metsikön hiilivarastot oletettiin vastaaviksi. Kasvufunktion parametrit kalibroitiin eri puulajeille. Malli sisälsi 250 eri lajia ja metsänhoitotyyppiä. Daigneault ym. (2012b)

Hiilivaraston muutos matemaattisesti esitettynä:

$$CC_t = TFCS_t^S + ER_t^S - TFCS_t^B, \text{ missä}$$

$TFCS$: koko metsän hiilivarasto

ER : päästöjen vähennys fossiilisten polttoaineiden korvaamisella

B : lähtötilanteen hiilivarasto

S : skenaarion hiilivarasto

Tuloksien mukaan bioenergian kysynnän kasvu korottaa puun hintaa, mikä lisää hakkuita. Hinnan nousu lisää myös investointeja metsäsektorille, jolloin metsäntuotanto kasvaa ja näin ollen myös hiilensidonta kasvaa. Maankäytön sääätely bioenergian

tuotannon rajoittamiseksi vähentää tulevia investointeja metsäsektorille, jolloin hiilensidonta laskee ja päästöt kasvavat. Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen biopolttoaineilla vähentää kasvihuonekaasuja, eikä tutkimuksen mukaan ole väliä onko tällöin maankäyttöä rajoitettu vai hyödynnetäänkö hakkuutähteet energiantuotantoon. (Daig-neault ym. 2012)

Asante ja Armstrong (2016) tutkivat metsän hiilivaraston muutoksen laskentatavan merkitystä ja optimaalista kiertoaikaa hiilensidonnasta maksettavaan kompensatioon nähden, kahden erilaisen kompensointihankkeen välillä Kanadassa. Tarkoituksena oli myös tarkastella, kuinka lähtötilanteen valinta vaikuttaa optimaalisen kiertoajan valintaan ja hiilensidontaan. Ensimmäisessä tilanteessa hiilivaraston muutos laskettiin vertaamalla vuosittain muuttuneen hiilivaraston määrää pysyvän alkutilanteen hiilivarastoon (fixed baseline). Toisessa tilanteessa hiilivaraston muutos laskettiin vertaamalla hankkeen aiheuttamat hiilivaraston muutokset alkutilanteessa mahdollisesti tapahtuneisiin hiilivaraston muutoksiin. Jälkimmäisessä tilanteessa haluttiin selvittää, kuinka metsää hoidettaisiin, jos hiilensidonnasta ei saisi tukiaisia. Valintaa tarkasteltiin MSY:n ja Faustmannin säännön mukaisiin lähtötilanteisiin. MSY:n mukainen kiertoaika oli 88 vuotta, jolloin vuosittainen keskimääräinen kasvu on maksimissa. Tutkimuksessa metsän hiilivarastoon laskettiin kuuluvaksi kaikki metsän kuollut orgaaninen aine (DOM, dead organic matter). Laskelmassa hyödynnettiin myös aiemmin mainitussa Lamersin ym. (2014) tutkimuksessa käytettyä CBM-CFS3 mallia parametrien arvojen hankinnassa. Tutkimuksessa:

Puun kasvufunktio esitettiin:

$V(a) = v_1(1 - e^{-v_2 a})^{v_3}$, missä $V(a)$ on puun volyymi (m^3ha^{-1}) iässä a ja v_1 , v_2 , v_3 ovat parametrit.

Biomassan kasvufunktio esitettiin:

$B(a) = b_1(1 - e^{-b_2 a})^{b_3}$, missä $B(a)$ on hiilensidonta (tCha^{-1}) elävissä puissa iässä a ja b_1 , b_2 , b_3 ovat kertoimet.

Jos hakkuita ei ole, DOM kasvaa:

$D_{t+1} = (1 - \alpha)D_t + \beta B(a)$, missä

α : maatumisaste

β : karikkeen määrä

Hakkuiden tapauksessa DOM kasvaa:

$$D_{t+1} = (1-\alpha)D_t + \beta B(a) - \gamma V(a), \text{ missä}$$

$\gamma V(a)$: hiilen poistuma hakkuiden yhteydessä, jossa vakio γ määrittää puuhun sitoutuneen hiilen määrän.

Kiertoaika Faustmannin tapauksessa laskettiin Faustmannin mallin diskreetin ajan versiona:

$$LEV^* = \max_t \left[\frac{P^W V(a) - (F^a + F^v V(a)) - E(1+r)^t}{(1+r)^t} \right], \text{ missä}$$

LEV: maan odotusarvo (land expectation value)

Rationaalisen metsänomistajan oletettiin toimivan kilpailullisilla markkinoilla, missä hiilensidonnasta saa tukiaisia ja päästöistä maksetaan veroa. Tukiainen ja vero määräytyy vuosittaisen hiilen määrän muutoksen mukaan. Jos muutos on positiivinen, metsänomistajalle maksetaan tukiaisia, negatiivisesta muutoksesta metsänomistaja joutuu maksamaan veroja. Veron ja tukiaisen hinta on määritetty olevan sama, perustuen tCO_2 :n muutokseen.

Jokaisen kiertoajan alussa on paljas maa ja lopussa kasvanut metsä päätehakataan. Dynaamisessa ohjelmointimallissa metsikön dynamiikkaa kuvattiin yhden vuoden välein. Tilamuuttujina käytettiin metsikön ikää ajassa t , metsikön alkuperäistä ikää, DOM-hiilivarastoa ja alkuperäistä DOM-hiilivarastoa. Metsänomistaja valitsee vuosittain päätehakkuiden ja metsänkasvatuksen väliltä. Hakkuiden jälkeen metsä uudistetaan välittömästi.

Taulukossa 3 on esitetty tuloksia kiertoajoista hiilidioksidin eri hinnoilla. Alkutilanteessa metsikön ikä on ollut 0 vuotta ja DOM:in (dead organic matter) hiilivarasto 370 tC ha^{-1} .

p^{CO_2} (CAD· (t of CO ₂) ⁻¹)	Rotation age (years)		
	Fixed baseline	Faustmann baseline	MSY baseline
0	73	73	73
1	74	75	76
2	75	76	77
5	78	79	79
10	84	84	85
20	101	101	102
30	139	139	139
35	> 250	> 250	> 250

Taulukko 3. Asante ja Armstrong (2016)

Kaikilla hiilidioksidin hinnoilla CAD (kanadan dollari) optimaalinen kiertoaika on melkein sama jokaisessa lähtötilanteessa. Optimaalinen kiertoaika kuitenkin kasvaa hiilidioksidin hinnan kasvaessa.

Taulukosta 4 nähdään maan, puutavaran ja hiilidioksidin arvo kanadan dollareissa, kun metsikön ikä alkutilanteessa on 0 ja DOM 0 tCha⁻¹. Hiilidioksidin hinta $p^{\text{CO}_2} = 20$ CAD tc⁻¹. Taulukon mukaan metsänomistajan kannattaisi valita pysyvä alkutilanne (fixed baseline), jos hiilensidonnasta maksetaan kannustimia. Pysyvän alkutilanteen skenaariorissa hiilivaraston arvot ovat huomattavasti suuremmat, kuin MSY:n tai Faustmannin säännön mukaisissa lähtötilanteissa.

Starting age (years)	MSY baseline	Faustmann baseline	Fixed baseline
Initial DOM = 100 tC·ha⁻¹			
50	1100	1200	3300
100	2200	2500	4800
200	4900	5100	7100
Initial DOM = 200 tC·ha⁻¹			
50	0	100	2100
100	1500	2000	3500
200	3500	4000	6000

Taulukko 4. Asante ja Armstrong (2016)

Tuloksien mukaan lähtötilanteen valinnalla ei ollut vaikutusta optimaalisen kiertoajan valintaan, eikä hiilensidonnasta lisääntymiseen. Lähtötilanteen valinta voi kuitenkin vaikuttaa metsänomistajan tuloihin. Jos lähtötilanteessa on nuori metsä, metsänomistaja saa enemmän kannustimia, kuin jos lähtötilanteessa olisi vanhempi metsä. Tutkimuksen mukaan rationaalinen metsänomistaja valitsisi mieluiten tilanteen, jossa tulevien vuosien hiilivarastoa verrataan pysyvään alkutilanteen hiilivarastoon, kuin MSY:n tai Faustmannin säännön mukaisesti toteutetun metsänhoidon. (Asante ja Armstrong 2016)

Tahvosen ja Rautiaisen (2017) mukaan hiilensidonnasta maksetut tukiaiset voivat tulla liian kalliiksi ja jopa tuplata metsän paljaan maan arvon. Siksi heidän mukaansa hiilensidonnasta saadut tukiaiset pitäisi arvottaa lisähyödyn periaatteen (additionality principle) mukaan. Lisähyödyn periaate voidaan ajatella tulevien vuosien hiilivaraston kehityksen tarkasteluna: vertaamalla hiilivaraston kasvua lähtötilanteeseen tai laske-
malla tulevien vuosien hiilivaraston kehityksen erotus alkutilanteen hiilivaraston kehityksestä. Vero määriteltiin maksettavaksi metsikön tuottavuuden mukaan tai verottamalla maa-aluetta, jolla pyrittiin välttämään vääristymät optimaalisissa kiertoajoissa. Tämä lisähyödyn periaate hiilivaraston kehityksen tarkastelusta vastaa pitkälti Asanten ja Armstrongin (2016) tutkimusta, jossa arvioitiin hiilen laskentatavan merkitystä.

Tutkimuksessa määritettiin metsikkötasolla optimaalinen kiertoaika hiilensidonta huomioiden. Puun volyymi hehtaarilla merkittiin funktiolla F metsikön iässä t , oletuksena oli:

$$F \in C^3, F(0)=0, F'(0)=0, F(t)>0 \text{ ja } F'(t)>0 \text{ kaikille } t>0, F'(t) \rightarrow 0 \text{ ja } F \rightarrow \hat{F}$$

$$\text{kun } t \rightarrow \infty, F''>0, 0<t<\hat{t}, F''<0, t>\hat{t} \text{ ja } F''/F' \text{ vähenee } t:n \text{ myötä} \quad (A)$$

Tutkimuksessa lisättiin hiilensidonta Faustmannin (1849) malliin, ja paljaan maan arvo maksimoitiin optimoimalla kiertoaika:

$$\max_{\{t \geq 0\}} J(t) = \frac{-w + \tau \int_0^t F'(s)e^{-rs} ds + e^{-rt}(p - \tau\beta)F(t)}{1 - e^{-rt}}$$

missä:

τ : yhteiskunnan kokonaiskustannus (€/ m³ puuta)

$$\tau = \gamma p_c$$

p_c : hiilen hinta CO₂:n mukaan,

γ : CO₂ pitoisuus per m³ puuta

β ($0 \leq \beta \leq 1$) on puutuotteista vapautuneen hiilen nykyarvo

Jos $\beta=1$, kaikki hiili vapautuu kerralla, jos $\beta=0$, hiili pysyy varastoituneena puutuotteissa ikuisesti.

Ensimmäisen kertaluvun optimiehto optimaaliseen rajalliseen kiertoaikaan:

$$J' = y/(e^{rt}-1) = 0, \text{ missä } y \equiv [p + (1 - \beta)\tau] F'(t) - r[(p - \tau\beta)F(t) + J(t)] = 0 \quad (6)$$

Tällöin on optimaalista hakata, kun rajakasvun arvo vastaa koron hintaa hakkuiden lykkäämisestä.

Derivoimalla (6) saatiin optimiehto:

$$J''|_{J'=0} = (e^{rt} - 1)^{-1} \{ [p + (1 - \beta)\tau] F''(t) - r(p - \tau\beta) F'(t) \}.$$

Rajallinen optimaalinen kiertoaika edellyttää vahvasti positiivisen arvon t , missä J' muuttuu positiivisesta negatiiviseksi. $J''|_{J'=0}$ vastaa:

$$\frac{F''}{F'} - \frac{r(p - \tau\beta)}{p + (1 - \beta)\tau}$$

(A):n mukaan F''/F' vähenee t :n myötä, eli mikään suurempi t :n arvo ei voi olla olemassa, kun $J'(t) = 0$. Näin ollen optimaalinen kiertoaika on rajallinen ja yksikäsitteinen.

Kun korkokanta r on 0, optimaalinen kiertoaika ratkeaa:

$$\tau \left\{ (1 - \beta) \left[F'(t) - \frac{F(t)}{t} \right] \right\} + p \left[F'(t) - \frac{F(t)}{t} \right] + \frac{w}{t}$$

Edellisestä yhtälöstä voitiin päätellä, että hiilidioksidipäästön hinnan ollessa positiivinen optimaalinen kiertoaika lyhenee, kun $\beta < 1$. Jos $r = 0$ ja $\beta = 1$ tai $r = \beta = w = 0$, ei hiilidioksidipäästön hinnalla ole vaikutusta optimaaliseen kiertoaikaan.

Jos kyseessä on uudistettu metsikkö ($t_0 > 0$), maan arvo on eri, kuin paljaan maan tapauksessa. Kun tällöin hiilensidonnan tukiaispolitiikka käytössä ja $\beta > 0$, syntyy vääristynyt tilanne, jossa metsänomistaja joutuu maksamaan hyvittämättömistä päästöistä. Tämä voi aiheuttaa vääriä kannustimia ja liian aikaisia hakkuita. Jos alkutilanteesta olevasta sidotusta hiilestä maksettaisiin tukiaisia tulevan kasvun myötä tapahtuvan hiilensidonnan lisäksi, tulisi tukiaisten maksaminen kalliiksi. Tutkimuksessa ehdotetaan vuosittain maksettavaa veroa lisääntyneestä hiilivaraston kasvusta. Tällä ei välttämättä olisi vaikutusta kiertoaikaan tai metsänomistajan tuloihin, mutta kannustaa säilyttämään maan nimenomaan metsämaana.

Tutkimuksessa analysoitiin myös hakkuiden, hiilensidonnan ja maankäytön optimointia markkinatasolla. Markkinatason ikäluokkamallia sovellettiin sisällyttären analyysiin maa- ja metsätalouden välisen maankäyttömuotojen vaihtelun. Pyrkimyksenä oli maksimoida hakkuiden, hiilivaraston ja maatalousmaan käytön hyödyt. Joka periodille pyrittiin valitsemaan kaadettavan metsän osuus joka ikäluokassa, sekä kuinka paljon paljasta maata on varattu sekä metsä- että maatalousmaan tapauksessa. Lagrangen menetelmää hyödyntären määritettiin Kuhn-Tuckerin ehdot ($t=0,1$) ja optimaalisen tasapainotilan täyttävät ehdot ratkaistiin.

Lisähyödyn periaatetta markkinoiden tapauksessa tarkasteltiin mallilla, joka maksimoi maanomistajan voitot hakkuiden ajoittamisen ja maankäyttömuodon valinnan mukaan. Puutavaran hinta, maanvuokra ja maa-alueen vero sisällytettiin malliin. Oletuksena oli, että päättäjä määrää tukiaisen ja lisähyödyn periaatteen mukaisen maan verotuksen käyttöön. Maanomistajan ongelma esitettiin:

$$\max_{\{x_t\}} \pi = \int_{t=0}^{\infty} b^t [p_{ct}c_t + p_{yt}y_t + \tau Q_t - \ell \sum_{s=1}^n x_{st}], \text{ missä}$$

ℓ : maan vero

p_{yt} : maavuokra

p_{ct} : puun hinta

Lagrangen menetelmää hyödyntären määritettiin Kuhn-Tuckerin ehdot kaikille $t=1 \dots \infty$, ja ensimmäisen kertaluvun välttämättömät ehdot ratkaistiin. Ehdoista voitiin päätellä, että tällä päättäjän ohjaamalla markkinalla tasapainotila vastaa yhteiskunnallisen optimin tasapainotilaa, kun maan verotus on 0.

Markkinatason analyysin ratkaisuja tutkittiin myös numeerisesti. Numeerinen laskenta osoitti, että optimaalinen hiilivarasto kasvattaa metsäaluetta ja puun tuotantoa pidentäen kiertoaikaa 75 vuodesta 90 vuoteen. Hiilivaraston arvo ilman päästöhintaa on 4 yksikköä ja optimaalisen säätelyn tilanteessa tämä nousee 7.4:ään, kun alkutilanteen hiilivarasto on laskettu mukaan. Kun vero asetettiin tasaamaan tätä eroa, tukiaisen ja veron yhteisvaikutus kasvattaa metsäaluetta, mutta hiilivarasto on pienempi, kuin optimitilanteessa.

Tukiaisen perustuessa metsänistutukseen tai puuntuotantoon, kasvaa metsäala ja puutuotanto liian suureksi kiertoajan pysyessä samana. Ilman lisähyödyn periaatetta samat lähtökohdat johtavat huomattavasti kalliimpaan tukiaisten maksuun kuin optimipolitiikassa. Tutkimuksessa ehdotettiin, että lisähyödyn periaate voitaisiin liittää optimipolitiikkaan asettamalla yleinen vero metsä- ja maatalousmaille tai vero metsäalueen tuottavuudesta. Jos maanomistajalla on sekä metsää että maanviljelytoimintaa, tukiaiset tulisivat kattamaan riittävät tulot. (Tahvonen ja Rautiainen 2017)

Sohngen ja Mendelsohn (2003) tutkivat globaalilla tasolla metsän potentiaalia ilmastomuutoksen hillitsemisessä, käyttäen hiilensidonnasta ja energiankäytön vähentämisen optimaalisen kontrollin mallia. Malliin on yhdistetty hiilensidonnasta aiheutuva kustannus. Oletuksena on, että jokaisesta sidotusta tonnista hiiltä metsänomistajille maksetaan tukiaisia vuosittain.

Malliin sisällytettiin empiiriset arvot muokkaamalla dynaamista DICE-mallia (Nordhaus (1992) ja globaalia puukauppamallia (Sohngen ym. 1999). DICE-malliin on yhdistetty sekä taloustiedettä että ilmastoa kuvaavia tekijöitä. Kasvihuonekaasujen kustannusten nykyarvo minimoitiin:

$$\min_{A(t)} \int_0^{\infty} [CE(A(t)) + D(X(t), t)] e^{-r t} dt$$

kun $\dot{X} = E(t) - A(t) - \lambda X(t)$, missä

λ : hiilivaraston maatuminen

$X(t)$: hiilivarasto

$D(X(t), t)$: vuotuinen hiilidioksidipäästöjen haitta

$CE(A(t))$: vuotuinen päästöjen vähentämisen kustannus energiasektorilla

$E(t)$: päästöt

Hiilensidonnan lisäämisen tehostamista tarkasteltiin metsämaan lisäämisellä $L(t)$, kiertoajan pidentämisellä $a(t)$ ja metsänhoitoa tehostamalla $m(t)$. Kaavaan lisättiin hiilensidonnan muutokset:

$$\min \int_0^\infty [CE(A(t)) + D(X(t), t) + CF(L(t), a(t), m(t))] e^{-rt} dt$$

$$A(t), L(t), a(t), m(t)$$

kun $\dot{X} = E(t) - A(t) - \lambda X(t) - S(L(t), a(t), m(t), t)$, missä

$CF(L(t), a(t), m(t))$: hiilensidonnan kustannusfunktio

$S(\cdot, t)$: hiilensidonnan lisäys

$E(t)$: päästöt energiankäytöstä ja maankäyttömuodon vaihtamisesta

Hamiltonin yhtälön avulla saatiin ensimmäisen kertaluvun ehdot, joista johdettiin:

$$1. \mu(t) = CE_A = \frac{D_X(X(t)) + CE_A}{(\lambda + r)}$$

$$2. CE_A = \frac{CF_L}{S_L} = \frac{CF_a}{S_a} = \frac{CF_m}{S_m}$$

Ensimmäinen ehto osoittaa, että yhden tonnin päästöjen vähentämisen marginaalikustannuksen pitäisi vastata jokaisen sidotun hiilen lisätonnin varjohintaa, sekä hiilitonnin haittavaikutuksia ja kasvavaa päästöjen vähentämisen nykyarvoa. Toisen ehdon mukaan päästöjen vähentämisen marginaalikustannuksen pitäisi vastata $L:n$, $m:n$ ja $a:n$ marginaalikustannuksia. Koska hiilivarastojen muutokset vaihtelevat ajan kuluessa, määriteltiin hiilivaraston arvo $R(t)$ tonni per vuosi:

$$R(t) = u(t) * [r - n(t)], \text{ missä}$$

$u(t)$: hiilen hinta

$$n(t) = [du(t)/dt] / u(t): \text{ hiilen hinnan nousu.}$$

DICE-mallilla laskettiin haittafunktio kahden eri skenaarion (odotettu ja epävarma) mukaan, joista jälkimmäinen kuvaa suurempaa haittaa. Tuloksien mukaan globaalit vuotuiset rajoittamattomat päästöt kasvavat vuoden 2000 tasolta (6.8 mrd. tonnia) ol-
len vuonna 2100 12.8 mrd. tonnia. Molemmissa skenaarioissa hiilen kustannus kasvaa
päästöjen kasvaessa ol-
len odotetun haitan skenaariossa vuonna 2100 61.74 \$/tonni ja
epävarman haitan skenaariossa 191.65 \$/tonni. Metsämaan ala kasvaa vuoden 2010

tasolta vuonna 2100 n. kolminkertaiseksi, ollen Euroopassa vuonna 2100 odotetun haitan skenaariossa 25.9 miljoonaa ha ja epävarman haitan skenaariossa 66 milj. ha. Globaalisti vastaavat luvut kuusinkertaistuvat ollen n. 416 ja 962.7 milj. ha. Kun hiilensidonta otetaan huomioon, laskee hiilen kustannus vain vähän hiukan molemmissa skenaarioissa. Hiilivaraston arvo kasvaa vuosina 2010-2100 ensimmäisessä skenaariossa (\$/tonni/vuosi) 0.04:stä 2.23:een ja toisessa 0.11:stä 6.88:aan. Hiilensidonta kasvaa Euroopassa ensimmäisessä skenaariossa (mrd. tonnia) 0.2:sta 1.7:ään ja toisessa 0.3:sta 4.3:een. Globaalisti vastaavat lukemat ovat 1.7:stä 38.6:een ja 4.5:stä 102.1:een mrd. tonniin. Kumulatiivinen päästöjen vähentäminen (mrd. tonnia) on ilman hiilensidontaa vuoteen 2100 mennessä ensimmäisessä skenaariossa 75.6 ja toisessa 203.1. Kun hiilensidonta otetaan huomioon, pysyvät luvut miltei samana lukujen ollen 75 ja 197.3. Hiilensidonta kasvaa vuoteen 2100 mennessä ensimmäisessä skenaariossa 38.6:een ja toisessa 102.1:een. (Sohngen ja Mendelsohn 2003)

4.2 Yhteenveto tutkimusten tuloksista

Metsänomistajia voidaan kannustaa metsänkasvatukseen maksamalla tukiaisia hiilensidonnasta, mikä kannustaisi metsän kasvattamiseen ja uudistamiseen, jolloin metsän hiilivarasto voitaisiin kasvattaa. Tukiaisia tarvitaan, kun metsänomistaja joutuu kasvattamaan metsää tasapainotilan yli (Tahvonen 1995). Tukiaisten määrään voisi vaikuttaa laskentatavasta riippuen mm. sidotun hiilen määrä, puutuotteen elinikä (Lintunen ja Uusivuori 2013) tai kansainvälisen päästöluvan hinta (Tahvonen 1995). Lisähyödyn periaatteen mukainen vero metsä- ja maatalousmaille tai metsäalueen tuottavuuden mukainen vero voisi myös tulla kysymykseen. Jos maanomistajalla on sekä metsää että maataloustoimintaa, voisi tukiaiset taata riittävät tulot (Tahvonen ja Rautiainen 2017).

Optimitilanteessa myös puutuotteiden tuotannosta ja bioenergian käytöstä aiheutuvista hiilidioksidipäästöistä tulisi maksaa veroja (Tahvonen 1995). Verolla voisi myös kompensoida tietyissä tilanteissa tukiaisten aiheuttamaa hiilivaraston arvonnousua. Tällöin kuitenkin hiilivarastosta voi tulla optimitilannetta pienempi. Jos veroa maksettaisiin vuosittain hiilivaraston kasvun mukaan, sillä ei välttämättä olisi vaikutusta kiertoaikaan tai metsänomistajan tuloihin, mutta kannustaisi pitämään

maan metsämaana, eikä muuttamaan sitä muuhun käyttöön (Tahvonen ja Rautiainen 2017).

Metsän hiilivaraston kasvattaminen pidentää kiertoaikaa ja lisää hiilensidontaa. Myös esim. hakkuutähteiden matalampi käyttöaste kasvattaa metsän hiilivarastoa. Puunkäytön suuremmalla päästökertoimella metsän kiertoaika ja biomassavaranto kasvaisi, jolloin metsän rooli hiilinieluna paranisi, mutta fossiilisten polttoaineiden korvaajana heikkenisi. Jos korkokanta on 0 ja kaikki hiilidioksidi vapautuu hakkuiden seurauksena, ei hiilipäästön hinnalla ole vaikutusta optimaaliseen kiertoaikaan. Kiertoaika pysyy myös samana, jos korkokanta, metsän uudistamisen kustannus ja hakkuista syntyvät CO₂ päästöt on 0. Toisaalta diskonttokorkojen ollessa kohtuullisia ja hakkuista saatavat tulot tappiollisia, voi optimaalinen kiertoaika olla ääretön. Jos hakkuista saadaan voittoa ja hiilen yhteiskunnallinen kustannus ylittää tietyn raja-arvon, ei metsää olisi optimaalista hakata koskaan. Vähäiselläkin hiilen yhteiskunnallisella kustannuksella yhteiskunnallinen hyvinvointi voidaan maksimoida, kun metsää ei hakata koskaan. (Tahvonen ja Rautiainen 2017)

Albedon määrään vaikuttaa hakkuut, eli metsässä olevan puuston määrä. Mitä suurempi määrä puita, sitä enemmän heijastavaa pinta-alaa syntyy. Albedon vaikutuksia ei mielestäni kannata nostaa kovin suureen rooliin metsävarojen käytöstä syntyvistä päästöistä puhuttaessa. Se näyttäisi kuitenkin tasoittavan puu- ja fossiilisten polttoaineiden lämmityspotentiaalia. (Holtsmark 2015b)

Puupohjaisten polttoaineiden käytön hyötyjä fossiilisten polttoaineiden korvaamiseksi ei voida pitää täysin itsestään selvyytenä. Taloustieteellisesti optimoitujen tulosten mukaan fossiilisten polttoaineiden korvaaminen biopolttoaineilla voi vähentää kasvihuonepäästöjä. Hiilen korkea yhteiskunnallinen kustannus kuolleen orgaanisen aineen keskimääräisen iän ollessa 100 vuotta, voi johtaa raakapuun käytön kannattavuuteen sekä fossiilisten polttoaineiden että hakkuutähteiden korvaamiseksi energiantuotannossa. Jos taas fossiilisten polttoaineiden toimiala on huomattavasti metsäsektoria suurempi, tulee fossiilisten polttoaineiden käyttö kannattavammaksi. Kun raakapuun hinta on riittävän matala, voitaisi kaikki mahdollinen raakapuu ottaa energiakäyttöön ilman, että se vaikuttaisi juurikaan energian hintaan. Suuri fossiilisten polttoaineiden toimiala heikentää metsäalan mahdollisuuksia vaikuttaa ilmastonmuutoksen hillintään. Puunkäytön suuremmalla päästökertoimella metsän kiertoaika ja

biomassavaranto kasvaa, jolloin metsän rooli hiilinieluna paranee, mutta fossiilisten polttoaineiden korvaajana heikkenee. (Lintunen ja Uusivuori 2013)

Samansuuntaisiin tuloksiin päädyttiin erilaisia malleja käyttämällä (Holtsmark 2015a, 2015b). GWPbio puupohjaisten polttoaineiden käytöstä voivat saavat merkittävästi suuremmat arvot, fossiilisten polttoaineiden GWP:stä 20 ja 100 vuoden aikajaksolla. Lämmitysvaikutus puupohjaisista polttoaineista on suunnilleen samalla tasolla, kuin öljystä 100 vuoden aikajaksolla, kun albedo ja hakkuutähteiden keräys otetaan huomioon. Jos hakkuutähteitä ei kerätä, on puupohjaisten polttoaineiden lämmitysvaikutus hiukan kivihiilen käyttöä korkeammalla tasolla 100 vuoden aikajaksolla. Pidentämällä aikajaksoa 500 vuoteen tulee puupohjaisten polttoaineiden käyttö kannattavammaksi fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna. Albedon vaikutuksella on vain pieni ero, kun hakkuutähteet kerätään verrattuna keräämättä jättämiseen.

5. TULOKSIEN VERTAILU

Sekä luonnontieteellisissä että taloustieteellisissä tutkimuksissa oli vahva konsensus, ettei metsävarojen käyttöä voida pitää hiilineutraalina. Tämä johtuu mm. pitkistä takaisinmaksuajoista, jolloin vapautunut hiili sitoutuu jälleen uuteen metsään. Lisäksi metsän hiilivarasto pienenee, kun puuta käytetään energiantuotannossa.

Jokaisessa tutkimuksessa todettiin, että metsänkasvu lisää hiilensidontaa. Samaan lopputulokseen tieteenalasta riippumatta päästiin myös siinä, että kiertoajan lisäys kasvattaa hiilivarastoa. Kun metsä saa kasvaa pidempään ilman hakkuita, se sitoo silloin myös enemmän hiiltä. Bioenergiankäyttöä ei pidetty lyhyellä aikavälillä parempana vaihtoehtona fossiilisen polttoaineen käyttöön verrattuna. Käytännössä jokaisessa tutkimuksessa todettiin bioenergian käytön hyötyjen saavuttamiseksi vaadittavan todella pitkä aika, n. >100 vuotta.

Kahden eri lähtökohdan tutkimuksilla oli jonkin verran eroavaisuuksia esim. malleissa, oletuksissa ja sillä, mihin tutkimukset keskittyivät. Luonnontieteellisissä tutkimuksissa käytettiin usein biologia- tai ekologiapohjaisia malleja, jotka syötetään tietokoneohjelmaan, kun taas taloustieteellisissä tutkimuksissa käytetään useammin matemaattisia taloustieteen malleja. Joissain luonnontieteellisissä tutkimuksissa ei oltu avattu niissä käytettyjä malleja juuri ollenkaan, kun tulokset oli ajettu tietokoneohjelman avulla. Kun luonnontieteellisissä tutkimuksissa keskityttiin mm. takaisinmaksu-aikaan, gwpbio:on ja hiilidioksidin lämmitysvaikutukseen ilmakehässä, taloustieteellisissä tutkimuksissa keskityttiin erilaisiin taloudellisen ohjauksen instrumentteihin, mm. veroon ja tukiaisiin.

Metodin ja mallin valinnan johdosta taloustieteellisissä tutkimuksissa tulokset esitettiin useammin matemaattisesti esim. optimiehtoja tulkiten, kun taas luonnontieteellisissä tutkimuksissa tulokset olivat useammin numeerisia. Tutkimusten luonteella oli vaikutusta tulosten yhtenevyyteen. Taloustieteellisissä tutkimuksissa tulokset olivat hiukan yhteneväisemmät, kun taas luonnontieteellisten tutkimusten antamat luvut saattoivat vaihdella suurestikin esim. mallien rajoituksia, oletuksia ja skenaarioita muuttamalla.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Kaikkien tieteenalojen tutkimuksissa päästiin samansuuntaisiin johtopäätöksiin monista asioista, vaikka tutkimusten metodit, tutkittavat kohteet ja tulokset erosivat toisistaan. Yksinkertaisten mallien laajentaminen antaa mahdollisuudet tutkia useampien muuttujien vaikutusta tutkittavaan asiaan, jolloin voidaan saada tarkempia tuloksia. Liian yksinkertaisilla malleilla saadut tulokset voivat sen sijaan olla vaikeammin hyödynnettävissä käytännön tasolla.

Mielenkiintoista oli huomata, miten biopolttoaineiden käytön hyöty suhteessa fossiiliin polttoaineisiin voidaan saavuttaa vasta hyvin pitkällä aikavälillä. Siksi päättäjien olisi syytä harkita vakavasti veron asettamista myös bioenergiankäytön piiriin, kuten mm. Tahvonen (1995) sekä Lintunen ja Uusivuori (2013) ehdottivat.

Tutkimuksia on tärkeää tarkastella kriittisesti, jotta metodeja voidaan kehittää ja tuloksia voidaan saada relevantimmiksi ja vertailukelpoisemmiksi. Liian kapea-alainen tutkimus jättää liikaa kysymysmerkkejä, ja niitä on vaikea soveltaa tosielämään.

Käyttämällä epäsovivaa dataa tai rajaamalla laskuista tärkeitä elementtejä, voi lopputuloksena olla muista eroavia tuloksia. Joskus tutkimukset antavat kuitenkin hyvää osviittaa ja suuntaviivoja päättäjille politiikan tekoon.

Taloustieteellisen näkökulman sisällyttäminen tutkimuksiin on välttämätöntä, koska niistä saadaan realistisemmat tulokset ja suuntaviivat politiikkaan. Ilman taloustieteellistä näkökulmaa on vaikeaa ottaa uskottavaa kantaa poliittisiin päätöksiin. Mitä tahansa poliittista päätöstä tehdään, on melkein aina suuressa roolissa myös raha.

Kun nykymaailmassa tasapainoillaan jatkuvasti ekologisen ja ekonominen kestävyysden kanssa, nousee taloustieteellinen optimointi suureen arvoon. Myös tärkeät taloudelliset ohjauskeinot ovat määriteltävissä vain taloustieteen keinoin.

Luonnontieteelliset tutkimukset ovat kuitenkin hyödyllisiä, vaikka niihin ei kannatakaan yksistään nojata poliittisia päätöksiä tehdessä. Luonnontieteellisten mallien vahvuus nähdään mm. IPCC:n laatimissa raporteissa, joissa GWP eri päästöistä on ilmaistu (Joos ym. 2013). Sekä luonnontieteellisissä että taloustieteellisissä tutkimuksissa voidaan hyödyntää tietoa yli tieteenalojen. Mikään tiedesuunta ei itsessään pois sulje tietoa muilta. Onkin tärkeää osata soveltaa analyysin keinoja ja tietoa yli

tieteenalojen, tukemaan oman tieteenalan tutkimusta. Poikkitieteellisellä tutkimuksella tulee olemaan jatkossakin iso rooli tieteentekemisessä ja siksi sitä tulisi kehittää jatkuvasti eteenpäin.

Tarkasteltavien tutkimusten valinnalla on myös vaikutusta tulosten yhteenvedoon ja johtopäätöksiin. Tämä työni ja sen johtopäätökset voisivat olla varsin erilaiset, jos olisin valikoinut varta vasten tietyn tyyppisiä ja samansuuntaisia tutkimuksia. Pyrin kuitenkin saamaan suhteellisen laajan otannan erilaisia tutkimuksia. Mielestäni tarkastelemani tutkimukset ovat kuitenkin pääosin linjassa laajemman tutkimusmassan kanssa. Joissain tutkimuksissa metodit ja mallit olivat suppeammin avattu kuin toisissa, jolloin niiden tarkastelu oli haastavampaa.

LÄHTEET

Asante P, Armstrong G. 2016. Carbon sequestration and the optimal forest harvest decision under alternative baseline policies. *Can. J. For. Res.* 46,656–665.

Bernier, P. ja Paré D. 2013. Using ecosystem CO₂ measurements to estimate the timing and magnitude of greenhouse gas mitigation potential of forest bioenergy. *GCB Bioenerg* 5(1):67–72.

Cherubini, F, Peters, G.P., Berntsen, T., Strømman, A.H., and Hertwich, E. 2011(a). "CO₂ emissions from biomass combustion for bioenergy: atmospheric decay and contribution to global warming." *GCB Bioenergy* 3 (5):413- 426.

Cherubini, F, Strømman, A.H., and Hertwich, E. 2011(b). "Effects of boreal forest management practices on the climate impact of CO₂ emissions from bioenergy." *Ecological Modelling* 223 (1):59-66.

Cherubini, F., Bright, M., R., Strømman, A., H. 2012. Site-specific global warming potentials of biogenic CO₂ for bioenergy: contributions from carbon fluxes and albedo dynamics. *Environ. Res. Lett.* 7 (2012).

Daigneault A, Sohngen B, Sedjo R. 2012. Economic Approach to Assess the Forest Carbon Implications of Biomass Energy. *Environmental Science & Technology*. (2012) 46, 5664–5671.

Daigneault A, Sohngen B, Sedjo R. 2012b. Supporting Information. An Economic Approach to Assess the Forest Carbon Implications of Biomass Energy.

FAO. 2010. Global Forest Resources Assessment 2010. Main report. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, Rome. 378s.

Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S., and Hawthorne, P. 2008. "Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt." *Science* 319 (5867):1235-1238.

Faustmann, M. 1849. "Berechnung des Werthes weichen Waldboden sowie nach nicht haubare Holzbestände für de Weltwirtschaft besitzen." *Allgemeine Forst und Jagd Zeitung* 25:441.

- Finnveden G, Hauschild MZ, Ekvall T ym. 2009. Recent developments in life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, 1, 1–21.
- G. C. van Kooten, C.S. Binkley, G. Delcourt. 1995. Effect Of Carbon Taxes and Subsidies on Optimal Forest Rotation Age and Supply of Carbon Services. *American Journal of Agricultural Economics*, Volume 77, Issue 2, 365–374.
- Guest, M, Cherubini, F, Strømman, A., H. 2013. The role of forest residues in the accounting for the global warming potential of bioenergy. *GCB Bioenergy* (2013) 5, 459–466.
- Hoel, M., Holtmark, B., Holtmark, K. 2014. Faustmann and the climate. *Journal of Forest Economics* 20 (2014) 192–210.
- Holtmark, B. 2012. Harvesting in boreal forests and the biofuel carbon debt. *Climatic Change* (2012) 112:415–428.
- Holtmark, B. 2015(a). Quantifying the global warming potential of CO₂- emissions from wood fuels. *GCB Bioenergy* (2015) 7, 195–206.
- Holtmark, B. 2015(b). A comparison of the global warming effects of wood fuels and fossil fuels taking albedo into account. *Statistics Norway*.
- Holtmark, B. 2015. Seven essays on policies and international cooperation to abate emissions of greenhouse gases. *Statistics Norway*.
- IPCC. 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 4: Forest land
- IPCC. 2013. Chapter 6: Carbon and other Biogeochemical Cycles.
- IPCC. 2019. Chapter 2: Land-Climate Interactions.
- Joos, F., Prentice, I.C., Sitch, S., Meyer, R., Hooss, G., Plattner, G-K., Gerber, S., Hasselmann, K. 2001. Global warming feedbacks on terrestrial carbon uptake under the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) emission scenarios. *Global Biogeochemical Cycles*, 15, 891–907.
- Joos, F., Roth, R., Fuglestad, J. S., Peters, G. P., Enting, I. G., von Bloh, W., Brovkin, V., Burke, E. J., Eby, M., Edwards, N. R., Friedrich, T., Frölicher, T. L.,

- Halloran, P. R., Holden, P. B., Jones, C., Kleinen, T., Mackenzie, F.T., Matsumoto, K., Meinshausen, M., Plattner, G.-K., Reisinger, A., Segschneider, J., Shaffer, G., Steinacher, M., Strassmann, K., Tanaka, K., Timmermann, A., and Weaver, A. J. 2013. Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics: a multi-model analysis. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 2793–2825, 2013
- Kimmins, J.P., Mailly, D., Seely, B., 1999. Modelling forest ecosystem net primary production: the hybrid simulation approach used in FORECAST. *Ecol. Model.* 122, 195–224.
- Lamers P, Junginger M. 2013. The ‘debt’ is in the detail: a synthesis of recent temporal forest carbon analyses on woody biomass for energy. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining.* 7:373–385.
- Lamers, P, Junginger M, Dymond C. C., Faaij, A. 2014. Damaged forests provide an opportunity to mitigate climate change. *GCB Bioenergy* (2014) 6, 44–60.
- Lintunen, J., Uusivuori, J. 2013. On the economics of forest carbon: Renewable and carbon neutral but not emission free. *Climate change and Sustainable Development*
- Marland G, Schlamadinger B. 1997. Forests for carbon sequestration or fossil fuel substitution? A sensitivity analysis. *Biomass and energy* Vol. 13, No. 6, pp. 389-397.
- Metsäkeskus 2016. Kemera-tuet. saatu 12.9.2019: [<https://www.metsakeskus.fi/kemera-tuet#.V6xEiXnQCuk>]
- Nordhaus W.D. 1992. The "DICE" model: Background, and Structure of a Dynamic Integrated Climate-Economy Model of the Economics of Global Warming. Cowles Foundation Discussion Paper No. 1009.
- Pingoud, K., Ekholm, T., and Savolainen, I. 2012. "Global warming potential factors and warming payback time as climate indicators of forest biomass use." *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 17 (4):369-386.

Rebitzer G, Ekvall T, Frischknecht R ym. 2004. Life cycle assessment part 1: framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, 30, 701–720.

Repo A, Känkänen R, Tuovinen J-P, Antikainen R, Tuomi T, Vanhala P, Liski J. 2012. Forest bioenergy climate impact can be improved by allocating forest residue removal. *GCB Bioenergy* (2012) 4, 202–212

Repo A, Tuomi M, Liski J. 2011. Indirect carbon dioxide emissions from producing-bioenergy from forest harvest residues. *GCB Bioenergy* (2011) 3, 107–115, doi: 10.1111/j.1757-1707.2010.01065.x

Repo A, Tuovinen J.P., liski J. 2015. Can we produce carbon and climate neutral forest bioenergy? *GCB Bioenergy* (2015) 7, 253–262.

Sas-ohjelmisto. 2019[viitattu 5.9.2019] saatu https://support.sas.com/documentation/cdl/en/statug/63033/HTML/default/viewer.htm#statug_transreg_sect010.htm

Schlamadinger, B., Marland, G. 1996. The role of forest and bioenergy strategies in the global carbon cycle. *Biomass and Bioenergy*, 10, 275–300.

Schnute, J., 1981. A versatile growth model with statistically stable parameters. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 38, 1128–1140.

Searchinger, T.D., Hamburg, S.P., Melillo, J., Chameides, W., Havlik, P., Kammen, D.M., Likens, G.E., Lubowski, R.N., Obersteiner, M., Oppenheimer, M., Robertson, G.P., Schlesinger, W.H., Tilman, G.D. 2009. *Science* 326, 527-528.

Sohngen B, Mendelsohn R, Sedjo R. 1999. FOREST MANAGEMENT, CONSERVATION, AND GLOBAL TIMBER MARKETS. *Amer. J. Agr. Econ.* 81 (February 1999): 1-13.

Sohngen B, Mendelsohn R. 2003. AN OPTIMAL CONTROL MODEL OF FOREST CARBON SEQUESTRATION. *American Journal of Agricultural Economics*. Volume 85, Issue 2, May 2003, Pages 448–457.

Spracklen, D.V., Bonn, B., Carslaw, K.S. 2008. . Boreal forests, aerosols and the impacts on clouds and climate. Philosophical Transactions Of The Royal Society A. 366, 4613–4626.

Storaunet K.O., Rolstad, J. 2002. Time since death and fall of Norway spruce logs in old-growth and selectively cut boreal forest. Can J For Res 32:1801–1812.

Tahvonen ja Rautiainen. 2017. Economics of forest carbon storage and the additionality principle. Resource and Energy Economics 50 (2017) 124–134.

Tahvonen, O. 1995. "Net national emissions, CO2 taxation and the role of forestry." Resource and Energy Economics 17 (4):307-315.

Tahvonen, O. AGERE–E04-kurssin luentomonisteet, luento 1. 2019.

Tieteen termipankki. saatu 9.3.2020 [<http://tieteentermipankki.fi/wiki/Geofyysiikka:s%C3%A4teilypakote>]

Tuomi M, Thum T, Järvinen H, Fronzek S. ym. (2009) Leaf litter decomposition – estimates of global variability based on Yasso07 model. Ecological Modelling, 220, 3362–3371.

Verohallinto 2019. saatu 11.9.2019: [https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/tietoa-yritysverotuksesta/valmisteverotus/valmisteverolajit/nestemaiset_polttoaineet/nestemaisten_polttoaineiden_verotauluk/]

Zanchi, G., Pena, N., Bird, N. 2012. Is woody bioenergy carbon neutral? A comparative assessment of emissions from consumption of woody bioenergy and fossil fuel. GCB Bioenergy (2012) 4, 761–772, doi: 10.1111/j.1757-1707.2011.01149.x